

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

СЛАЩОВ Ігор Миколайович



УДК [622.831.312 : 622.261.5 : 622.28.042] (043.3)

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ГЕОМЕХАНІЧНОГО
ТА РАДІОМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ ШАХТ

05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка»
05.26.01 – «Охорона праці»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро - 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор
Шевченко Володимир Георгійович,
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
НАН України (м. Дніпро),
учений секретар інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Голінько Василь Іванович,
НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України (м. Дніпро),
завідувач кафедри охорони праці та цивільної безпеки;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Калугіна Надія Олександрівна,
Інститут фізики гірничих процесів НАН України (м. Дніпро),
учений секретар інституту;

доктор технічних наук, доцент
Філатьєв Михайло Володимирович,
Східноукраїнський національний університет
ім. Володимира Даля МОН України (м. Сєверодонецьк),
доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового
планування.

Захист відбудеться « 7 » травня 2021 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою:

49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2А, тел. (056) 746-01-51.

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

Автореферат розісланий « 6 » квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01
доктор технічних наук, професор


М.С. Четверик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення енергетичної безпеки України є пріоритетним завданням сучасної гірничої науки, вирішення якої пов'язане з ефективним і безпечним видобутком вугілля. Разом з тим, гірничодобувні підприємства стикаються з об'єктивними природними факторами, які знижують темпи видобутку та продуктивність праці. Перша проблема пов'язана зі збільшенням проявів гірського тиску, особливо в умовах, коли пласти залягають в породах низької міцності і руйнуються попереду очисних і підготовчих вибоїв. Друга проблема пов'язана зі збільшенням темпів видобутку, внаслідок чого зростає швидкість оголення і руйнування порід покрівлі, що при високій метановисловності породного масиву призводить до інтенсивного загазування виробок, викидів вугілля і порід, підвищення викидів метану в атмосферу.

Незважаючи на те, що видобуток вугілля на наших шахтах не перевищує одного відсотка від світового, Україна займає четверте місце в світі по викидах метану в атмосферу. Заходи по боротьбі з парниковими газами приймаються у всьому світі, однак їх недостатньо. Серед комплексу заходів істотний внесок має вдосконалення гірничих технологій, які забезпечують зниження виділення метану в гірничі виробки шахт і його викиди в атмосферу. Розробка елементів таких технологій вимагає зусиль дослідників щодо встановлення закономірностей емісії газу метану в гірничі виробки, пошуку нових способів контролю ризиків проявів небезпечних процесів.

Проблеми руйнування породного масиву, стійкості гірничих виробок і безпеки гірничих робіт взаємопов'язані внаслідок нерозривності природних, техногенних і суб'єктивних людських факторів. Зниження ризиків виникнення аварійних і травмонебезпечних ситуацій можливо шляхом: моніторингу параметрів стану гірських порід, оцінки прийнятих рішень за допомогою цифрових інформаційних технологій, обґрунтування параметрів систем контролю безпеки ведення гірничих робіт і вироблення практичних заходів щодо підвищення рівня безпеки. Гостро стоять питання розробки науково-методичного та нормативного забезпечення, що включає сучасні принципи математичного моделювання геомеханічного і газодинамічного станів породного масиву, нові методи шахтного контролю процесів руйнування та газовиділення, методи прогнозування стійкості масиву порід і охоронних систем гірничих виробок.

Ідентифікація рівнів небезпеки і ризиків стримується недостатньою узгодженістю різних способів аналізу параметрів моніторингу середовища, що надходять від персоналу і автоматизованих систем, а також недосконалістю алгоритмів оцінки поточної ситуації та сценаріїв розвитку процесів в породному масиві. Тому встановлення закономірностей змін напружено-деформованого стану газонасичених структурно-неоднорідних порід під впливом гірничих робіт, емісії газів метану та дочірніх продуктів розпаду радону в гірничі виробки, а також обґрунтування комплексних показників ризиків небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві, розробка методів, алгоритмів і програмно-технічних засобів геомеханічного і радіометричного контролю параметрів безпеки виробничого середовища шахт та

вдосконалення нормативно-технічних документів є **актуальною науково-технічною проблемою**, що має суттєве значення для підвищення безпеки і ефективності експлуатації гірничодобувних підприємств.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт: «Механіка газонасиченого масиву гірських порід, прогресивні техніко-технологічні рішення підземного видобутку вугілля», № ДР 0107U006037; «Дослідити та встановити параметри способів термічної переробки шламів і некондиційного вугілля для розробки енерготехнологічного комплексу по їх утилізації», № ДР 0107U002003; «Розроблення апаратури (приладів) для вимірювання радіаційного випромінювання у вугільних шахтах для проведення оцінки і здійснення контролю безпечних умов праці (за викиднебезпекою, газоносністю, запиленістю та іншими чинниками)», № ДР 0104U009031; «Дослідити способи управління гірським тиском і розробити науково-технічні пропозиції щодо їх удосконалення для умов відпрацювання пласта h_7 шахти «Нестор»», № ДР 0112U002486; «Розробка методів керування напружено-деформованим та газодинамічним станом гірського масиву впливом різноманітних робочих середовищ», № ДР 0112U000493; «Встановлення закономірностей зміни стану гірського масиву при сумісному фізико-хімічному та імпульсному впливі», № ДР 0117U003056; «Розвиток наукових засад керування станом гірського масиву і поліпшення умов та безпеки праці гірників при видобутку уранових руд із застосуванням сучасних програмно-інформаційних комплексів», № ДР 0117U004231; «Вдосконалення методів функціонування підсистеми управління персоналом на рудних шахтах та кар'єрах» (у яких автор був виконавцем); «Розвиток теорії та методів керування станом геотехнологічної системи “масив суміжних виїмкових діляниць – підтримання та вентиляція виробок” для забезпечення інтенсифікації роботи гірничодобувних підприємств», № ДР 0115U002534; «Розвиток наукових основ ризик-орієнтованого керування станом геотехнічної системи «породний масив – підтримання і провітрювання виробок», № ДР 0115U002534 (у яких автор був відповідальним виконавцем).

Ідея роботи полягає у використанні встановлених закономірностей зміни напружено-деформованого стану газонасичених структурно-неоднорідних порід, емісії газів метану та радону в гірничі виробки шахт, розроблених методів і програмно-технічних засобів для підвищення ефективності гірничих робіт, виявлення локацій небезпечних зон методом радіометричного контролю та зниження ризиків виникнення аварійних і травмонебезпечних ситуацій.

Об'єкт дослідження: процеси руйнування гірського масиву та емісії газу метану і продуктів розпаду радону в гірничі виробки вугільних шахт.

Предмет дослідження: закономірності змін напружено-деформованого стану газонасичених структурно-неоднорідних порід, технології підтримання підготовчих гірничих виробок, методи геомеханічного та радіометричного контролю виробничого середовища шахт, показники ризиків та критерії безпеки ведення гірничих робіт.

Мета роботи – розвиток наукових основ геомеханічного та радіометричного контролю параметрів безпеки шахт з урахуванням показників і критеріїв напружено-деформованого стану структурно-неоднорідних порід та закономірностей емісії метану і радону в гірничі виробки для підвищення безпеки та ефективності гірничодобувних підприємств.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

- обґрунтувати геомеханічну модель, розробити методи і алгоритми визначення напружено-деформованого стану структурно-неоднорідних, обводнених і газонасичених порід;
- встановити закономірності та визначити параметри сумісного протікання геомеханічних і газодинамічних процесів в масиві порід для ризикорієнтованих систем контролю виробничого середовища шахт;
- обґрунтувати параметри радіометричного контролю безпеки виробничого середовища шахт і встановити взаємозв'язки між геомеханічними процесами та емісією газу метану і продуктів розпаду радону в гірничі виробки;
- ідентифікувати потенціальні ризики проявів гірського тиску в виробках шахт та розробити методи прогнозу передаварійних ситуацій в геотехнічній системі з використанням інформаційних технологій і методів радіометричного контролю;
- обґрунтувати параметри системи дистанційного геомеханічного та радіометричного контролю безпеки виробничого середовища шахт;
- розробити і впровадити науково-методичне забезпечення та нормативні документи з геомеханічного і радіометричного контролю параметрів безпеки та управління охороною праці на шахтах.

Методи досліджень: аналіз та узагальнення експериментальних даних; математичне моделювання геомеханічних і фільтраційних процесів з використанням законів фізики гірських порід і механіки суцільного середовища; метод скінченних елементів, аналітичні та програмні моделі його реалізації; лабораторні дослідження властивостей гірських порід; шахтні дослідження стійкості гірничих виробок і змін активності випромінювань окремих ізотопів радону; статистична обробка результатів вимірювань; методологія організації обчислювальних процесів, методів і алгоритмів для визначення параметрів зональності та просторової орієнтації систем тріщин в породному масиві; методи побудови структури і програмних моделей інформаційних систем для розробки базових елементів інформаційних технологій; методи реалізації алгоритмів нечіткої логіки для перетворення вхідних сигналів; економічний аналіз результатів.

Основні наукові положення, що захищаються в дисертації:

1. Параметром ідентифікації рівня безпеки гірничих виробок по газовому фактору є об'єм емісії газу метану, визначений з урахуванням головних напружень і деформацій, поширеності зон непружних деформацій, а також змін об'ємів порово-тріщинного простору під впливом гірничих робіт, які в процесі відпрацювання лави збільшуються на 70...90 % в умовах зниження максимальних головних напружень на 60...80 %, при цьому витрати фільтраційного переносу газів через гірські породи в виробку прямо пропорційні природній відкритій пористості, мінімальним деформаціям, куту між напрямом фільтрації і простя-

ганням тріщин, різниці тисків на контурі живлення і на галереї стоку, а обернено пропорційні довжині шляху фільтрації для плоских контурів живлення та радіусу дренажу для кільцевих контурів живлення.

2. Стійкість гірничих виробок в умовах обводнених порід забезпечується рамно-анкерним кріпленням, при якому зміщення і розширення тріщин покрівлі зростають у часі за логарифмічними залежностями з середньодобовою швидкістю в період активних зсувів в 300-500 разів вищою ніж в період сталих зсувів, зростання тріщин призупиняється через один-два місяці і активізується по межі закріплення анкерів і, навпаки, зростання тріщин в вищерозташованому масиві сповільнюється, при цьому величина розширення тріщин в зоні анкерування в три-п'ять разів нижче, що визначає механізм сприйняття анкерами навантаження для побудови систем комбінованого кріплення з асиметричною піддатливістю і (або) вантажонесучою здатністю.

3. Емісія газу метану в свердловини при віддаленні від очисного вибою змінюється за затухаючою квазіперіодичною залежністю з адитивними функціональними рівняннями і рекомбінантними змінами напружено-деформованих станів перенапружених та розвантажених ділянок породного масиву, при цьому для умов сполученого з гірничою виробкою виробленого простору період збільшується з 59 м до 82 м, амплітуда зменшується до 30 %, адитивна складова квазіперіодичної функції лінійно зростає, а в породах покрівлі підготовчої виробки, навпаки, лінійно знижується.

4. Емісія в гірничі виробки метану спільно з дочірніми продуктами розпаду радону залежить від джерел формування, швидкостей переміщення через пори і тріщини, динамічних змін напружено-деформованого стану порід в приконтурній зоні виробок і має стійкий взаємозв'язок між синхронними змінами концентрації метану і наведеною концентрацією дочірніх продуктів розпаду радону в діапазоні відхилень від середнього значення $\pm 20\%$ та асинхронно протифазні сплески в діапазоні відхилень вище 20 %, а інтенсивність росту ізотопів Po^{218} в 2...4 рази перевищує інтенсивність росту ізотопів Pb^{214} і Bi^{214} і лінійно зростає в залежності від відстані до вибою виробки.

5. Рівні безпеки ведення гірничих робіт встановлюють комплексними показниками, які характеризують готовність породного масиву до небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів шляхом підсумовування і відбору максимальних значень ризиків в групах інтегральних показників змін міцності гірських порід, нерівнокомпонентності полів напружень і деформацій, інтенсивності змін зон руйнування, які визначають за статистично значущою кількістю параметрів попередніх подій або за трендами і прогнозами подальших подій з залученням моделей нечіткої логіки та експертних правил, при цьому ризики зниження міцності гірських порід від впливу фактора обводнення в діапазоні глибин 400...1200 м лінійно зростають з інтенсивністю 0,62...0,71 – для аргілітів, 0,49...0,58 – для алевролітів, 0,25...0,37 – для пісковиків.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Подальший розвиток отримала математична модель для оцінки зон руйнування в газонасичених та обводнених гірських породах, яка відрізняється

спільним урахуванням природних структурних дефектів, магістральних тріщин, шаруватості порід, пластових газових тисків, наявності води в тріщинах і порах, а також визначенням інваріантів компонент головних деформацій, які характеризують зміни форм і об'ємів порово-тріщинного простору де формуються області газового живлення в процесі ведення гірничих робіт.

2. Вперше для використання в геоінформаційних системах отримані аналітичні залежності між параметрами геомеханічного процесу – тріщинною пористістю, кутами падіння і простягання систем тріщин з параметрами газодинамічного процесу – інтенсивністю, витратами і напрямками переміщення газів, що дозволило розробити нові алгоритми визначення параметрів тріщинуватих зон з використанням методів контролю емісії газу метану та еманції дочірніх продуктів розпаду радону в атмосфері гірничих виробок.

3. Вперше встановлена затухаюча квазіперіодична залежність емісії газу метану в свердловини, що дозволяє визначати зональність ділянок підвищеного газовиділення в виробки та схеми розташування свердловин для збільшення ефективності дегазації і забезпечення безпеки ведення гірничих робіт.

4. Вперше запропоновано співвідношення для оцінки передбачуваних об'ємних витрат газу в області впливу свердловин на базі розрахунків приросту кульової частини тензора деформацій і об'ємів зруйнованих елементів геомеханічної моделі, що дозволяє прогнозувати продуктивність газової свердловини з довільною конфігурацією робочої зони.

5. Вперше розроблено метод прогнозу потенційно небезпечних проявів гірського тиску в виробках шахт, який заснований на ідентифікації синхронних, асинхронно протифазних або хаотично стрибкоподібних одночасних змін інтенсивності відхилень від середнього значення величин концентрації метану і параметрів наведеної еквівалентної рівноважної об'ємної активності емісії дочірніх продуктів розпаду радону в газоповітряному середовищі виробок.

6. Вперше для умов глибоких горизонтів вугільної шахти встановлено залежність еманцій в гірничу виробку короткоживучих α -частинок Po^{218} та взаємопов'язаних еманцій продуктів розпаду радону Pb^{214} і Bi^{214} , які мають більш тривалий період напіврозпаду, з утворенням тріщин і руйнуванням гірських порід, що дозволяє на базі радіометричного моніторингу виявляти дислокацію новоутворених систем тріщин.

7. Подальший розвиток отримав метод оцінки рівнів безпеки ведення гірничих робіт, що відрізняється використанням комплексних показників, які отримані за підсумуванням і відбором максимальних значень в групах факторів ризиків, визначених за сценаріями розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів.

8. Отримали розвиток методи функціонування підсистеми управління персоналом і підтримки прийняття рішень, які відрізняються ієрархічною структурою побудови систем контролю гірничотехнічних процесів та розширеними функціями щодо статистичних обробок комплексу виробничих показників.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей змін напружено-деформованого стану газонасичених структурно-неоднорідних порід та емісії газів метану та продуктів розпаду радону в гірничі виробки шахт,

обґрунтуванні показників ризиків виникнення небезпечних сценаріїв при розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві, принципів побудови ієрархічної структури функціонування програмно-технічних засобів, які, в сукупності, забезпечили можливість і умови для розробки методів, методик, рекомендацій та нормативних документів з геомеханічного та радіометричного контролю безпеки виробничого середовища шахт, що дозволяє підвищити ефективність гірничих робіт та знизити ризики виникнення аварійних і травмонебезпечних ситуацій на виробництві.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується коректною постановкою завдань досліджень; застосуванням апробованих методів механіки гірських порід, механіки суцільного середовища, теорії ризиків, нечіткої логіки і побудови інформаційних систем; обробкою статистично значущого об'єму даних властивостей порід, зміщень і деформацій виробок, параметрів дегазаційних свердловин, емісії продуктів розпаду радону в гірничі виробки; значною кількістю проведених чисельних експериментів по виявленню особливостей напружено-деформованого стану породного масиву; узгодженістю результатів математичного моделювання геомеханічних процесів з натурними даними, що забезпечує надійність результатів не нижче 95 % при відносній похибці не більше 25 %; позитивною апробацією на практиці рекомендацій та елементів цифрових систем контролю параметрів безпеки; впровадженням нормативно-технічних документів з обґрунтованими технічними, економічними і соціальними ефектами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено ряд методик і рекомендацій щодо комплексного моніторингу проявів гірського тиску та обґрунтування силових характеристик системи «кріплення-масив» для умов анкерного та комбінованого рамно-анкерного способів підтримання гірничих виробок з урахуванням непружних деформацій і тріщинуватості гірських порід. Результати увійшли в Стандарт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України СОУ 10.1.05411357.010:2014 «Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги».

2. Розроблено нове програмне забезпечення для моделювання геомеханічних і газодинамічних процесів, яке відрізняється процедурами обчислення інтегральних характеристик стану середовища з урахуванням газо- і водонасиченості гірських порід, яке показало високу ефективність: при обґрунтуванні способів забезпечення стійкості виробок і підземної дегазації на пластах m_3 і l_4 ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядька»; при оцінці надійності систем комбінованого кріплення на пластах C_4 і C_5 шахт «Самарська» і «Павлоградська»; при оцінці способів управління гірським тиском на пласті h_7 шахти «Нестор».

3. Розроблено елементи технологій дегазації з урахуванням напружено-деформованого стану породного масиву, які використовуються на шахтах України і регламентуються СОУ «Дегазація вугільних пластів і вміщуючих порід. Схеми дегазації», що сприяє підвищенню безпеки праці гірників при розробці газоносних вугільних пластів і зростанню навантаження на очисний вибій.

4. Розроблено новий спосіб видобутку метану на полях закритих вугільних шахт, який використовує особливості процесу формування газових колекторів в порушеному гірничими роботами породному масиві.

5. Розроблено «Концепцію безпечного підтримання і провітрювання гірничих виробок з використанням ефективних методів, способів кріплення, схем провітрювання і дегазації».

6. Розроблено «Методику встановлення впливу волого- і газонасиченості на процеси тріщиноутворення та руйнування гірських порід і руху двофазних потоків в системі «гірнича виробка - вироблений простір»», що дозволяє ідентифікувати фактори ризику втрати стійкості породного масиву.

7. Розроблено «Методичні рекомендації щодо оцінки умов накопичення газу метану в гірничих виробках і визначення зон тектонічної порушеності на основі радіаційного контролю газу радону та продуктів його розпаду».

8. Розроблено новий спосіб прогнозу потенційно небезпечних проявів гірського тиску в виробках шахт з використанням методу радіометричного контролю, який дозволяє виявити потенційно небезпечні зони в масиві порід.

9. Розроблено «Науково-методичні рекомендації з комплексної оцінки геомеханічних і газодинамічних параметрів стану масиву порід для забезпечення безпеки систем підтримання гірничих виробок», які дозволяють розрахувати ризики виникнення проявів небезпечних факторів (базового параметра для систем безпеки), своєчасно попередити персонал і вжити превентивні заходи для запобігання руйнування систем підтримання виробок.

10. Розроблено «Методичні рекомендації з особливостей застосування інформаційної системи для прогнозування інтегральних показників оцінки небезпечних станів граничнонапружених гірських порід», які дозволяють визначити інтегральні параметри і комплексні показники в групах факторів ризиків, які впливають на виникнення газодинамічного явища.

11. Розроблено командний інтерфейс підсистеми підтримки прийняття рішень, який відрізняється ієрархією побудови властивостей підсистеми і прив'язкою до її функціональних можливостей, статистичною обробкою даних, що дозволяє дізнатися, де саме сталася подія і яка, знайти джерело помилкових рішень і дій.

12. Розроблена та погоджена остаточна редакція Стандарту України СОУ 10.1.00174088.018:2018 «Система управління виробництвом і охороною праці у вугільній промисловості України», який сприяє безпечному веденню гірничих робіт, охороні праці та результативності управління ризиками.

Реалізація результатів роботи.

Основні результати досліджень використані при розробці і впровадженні методик, рекомендацій, програмного забезпечення та нормативних документів: способів управління силовими характеристиками системи «кріплення-масив» і підвищення стійкості та безпеки більше 20 км підготовчих виробок в умовах рамно-анкерного кріплення на пластах l_3 , l_4 , m_3 шахти ім. О.Ф. Засядька (Методичні рекомендації від 03.11.2009 р.; Довідка про впровадження від 25.03.2010 р.); наукового супроводу технологій дегазації на шахтах Мінвуглепрому України з урахуванням напружено-деформованого стану породного ма-

сиву, що підвищує навантаження на очисний вибій за газовим фактором, має соціальний, екологічний та економічний ефекти (Стандарт від 01.04.2008 р.; Довідка про розрахунок дольової участі в фактичному економічному ефекті від 19.09.2013 р.); програмного забезпечення з аналізу і управління параметрами процесів енерготехнологічного комплексу (Методичні рекомендації від 04.04.2012 р.; Рекомендації від 04.04.2012 р.; Акт передачі від 04.04.2012 р.; Протокол від 19.04.2012р.; Довідка про очікуваний економічний ефект від 12.02.2014 р.); галузевого Стандарту України СОУ 10.1.05411357.010:2014. «Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги», який за наказом Мінвуглепрому України з 2014 року впроваджується на вугільних шахтах для забезпечення стійкості гірничих виробок з анкерним кріпленням і підвищення навантаження на очисний вибій, що має соціальний і економічний ефекти; остаточної редакції галузевого Стандарту України СОУ 10.1.00174088.018:2018 «Система управління виробництвом і охороною праці у вугільній промисловості України», який регламентує вимоги до безпечного ведення гірничих робіт і охорони праці з використанням параметрів результативності управління ризиками та вимог міжнародних стандартів OHSAS 18001 та ISO 9001. Загальний економічний ефект від впровадження наукових розробок складає 4,8 млн грн, в тому числі фактичний – 2,0 млн. грн, очікуваний – 2,8 млн. грн.

Особистий внесок здобувача полягає в: формулюванні мети і основних завдань досліджень; обробці даних і аналізі результатів; обґрунтуванні геомеханічних моделей, розробці методів і алгоритмів визначення напружено-деформованого стану структурно-неоднорідних, обводнених і газонасичених порід; визначенні параметрів сумісного протікання геомеханічних і газодинамічних процесів в масиві порід для ризик-орієнтованих систем контролю безпеки шахт; обґрунтуванні параметрів радіометричного контролю та параметрів безпеки виробничого середовища шахт; ідентифікації потенційних ризиків проявів гірського тиску в виробках шахт і розробці методів прогнозування передавальних ситуацій в геотехнічній системі з використанням інформаційних технологій та методів радіометричного контролю; розробці програмного забезпечення для моделювання геомеханічних і газодинамічних процесів; розробці елементів технологій дегазації, нових способів видобутку метану і прогнозу потенційно небезпечних проявів гірського тиску в виробках шахт з використанням методу радіометричного контролю; розробці методик, рекомендацій та вдосконаленні нормативних документів. Ідея роботи, наукові положення, висновки і рекомендації, текст дисертації і автореферат викладені автором особисто.

Апробація результатів досліджень. Основні положення і результати досліджень доповідались й обговорювалися на: XIX, XX, XXI, XXII Міжнародних наукових школах ім. академіка С.О. Христіановича «Деформування і руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища в гірських породах і виробках» (м. Алушта, 21-27.09. 2009 р.; 20-26.09. 2010 р.; 20-26.09. 2011 р.; 17-23.09. 2012 р.); X-XVII конференціях «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (м. Дніпро, 2012-2019 рр.); XI Всеросійській науково-практичній конференції «Інформаційні технології та математичне моделювання» (м. Анжеро-

Судженськ, 23-24.11.2012 р.); Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки» (Дніпропетровськ, 16-19.04.2012 р.); Науково-технічній нараді «Створення програмно-технічного комплексу центра управління безпекою ОП «Шахта ім. О.Ф. Засядька»» (м. Київ, ІПММ НАН України, 08.08.2011 р.); Науково-практичному семінарі «Стратегічне планування розвитку гірничих робіт» (м. Донецьк, 29.01.2013 р.); Науково-технічній раді Мінергосекції «Охорона праці, промислова безпека та цивільний захист у ПЕК» (м. Київ, 06.03.2018 р.); Семінарі Академії управління ризиками в системах менеджменту «Керування ризиками небезпеки в системах управління гігієни та безпеки праці підприємств» (Дніпро, 04.02.2020 р.); Міжнародних конференціях «Нариси гірничої науки і практики» (Дніпро, 25-27.06.2019 р., 22-24.04.2020 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 58 наукових робіт, у тому числі 7 публікацій у закордонних періодичних виданнях та у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, 1 монографія, 30 наукових статей у фахових виданнях, 6 у матеріалах конференцій, 2 у всеукраїнських виробничо-практичних журналах, 2 галузевих стандарти України, 10 патентів.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел з 397 найменувань на 46 стор., містить 547 сторінок машинописного тексту, 30 таблиць та 149 рисунків, з яких 77 на окремих сторінках (основна частина 291 сторінка), а також 30 додатків на 84 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведено аналіз стану проблеми забезпечення стійкості гірничих виробок та безпеки праці на гірничодобувних підприємствах. Показано, що питання руйнування породного масиву, стійкості гірничих виробок і безпеки робіт взаємопов'язані внаслідок нерозривності природних, техногенних і суб'єктивних факторів. Значна аварійність, високий рівень травматизму і профзахворювань на гірничодобувних підприємствах знижує економічні показники роботи шахт. Основною причиною ризиків втрати стійкості гірничих виробок є складні природні гірничо-геологічні умови видобутку (низька міцність, обводненість, газонасиченість гірських порід) і високі рівні гірського тиску. Ці фактори призводять до підвищення небезпеки умов праці: ризиків руйнування кріплення, обвалів гірських порід, завалів виробок, виникнення гірських ударів, вибухів газу і пилу, викидів порід, вугілля і газу. В той же час, основна причина вибухів пилогазових сумішей полягає в утворенні неприпустимих концентрацій метану і вугільного пилу, які виникають внаслідок інтенсифікації гірничих робіт. Негативних наслідків цих процесів можна уникнути, якщо контролювати напружено-деформований стан (НДС) породного масиву, виконувати заходи з підтримання виробок, дегазації, знепилювання, припинення робіт тощо.

Розвитку існуючих теорій і методів підвищення безпеки і ефективності експлуатації гірничодобувних підприємств присвячені роботи вчених ІГТМ НАН України, НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України, ІФГП НАН

України, ДВНЗ «ДонНТУ» МОН України, СХУ ім. В. Даля, МакНДІ, ДонВУГІ, НДІГС «Респіратор»; суттєві результати отримані вченими США, Польщі, Великої Британії, Німеччини, Китаю, РФ, Казахстану та інших країн. Для підвищення безпеки шахт в Україні розроблені методи моніторингу породного масиву і автоматизовані системи збору та обробки первинної інформації. Однак як показує практика, значний об'єм первинної інформації моніторингу не може бути в достатній мірі достовірно інтерпретований для забезпечення необхідної безпеки шахт. Недоліками існуючих розробок є те, що вони не враховують закономірності змін НДС газонасичених структурно-неоднорідних порід під впливом гірничих робіт і емісії газів метану та дочірніх продуктів розпаду радону в гірничі виробки. Відсутні показники ризиків небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві, методи і програмно-технічні засоби геомеханічного та радіометричного контролю параметрів безпеки виробничого середовища шахт.

У 2018 році на глобальному форумі з метану 42 країни-партнера по Глобальній метановій ініціативі (Global Methane Initiative, GMI) підтвердили пріоритети роботи на майбутні 10 років. У Технічному завданні GMI говориться, що кожна країна повинна виконати План дій, який спрямований на спільні цілі, в тому числі, на боротьбу з викидами і на технології вилучення та використання метану. Серед комплексу заходів, які необхідно вживати, істотний внесок мають заходи з вдосконалення гірничих технологій, що забезпечують зниження виділення метану в гірничі виробки шахт і його викиди в атмосферу.

Застосування розроблених в ІГТМ НАН України способів дегазації вугільних пластів дозволило дегазувати великі об'єми зон обвалення порід, що сприяло видобутку з однієї лави більше тисячі тонн вугілля на добу. Разом з тим, навіть комплексне застосування кількох способів і засобів боротьби з метаном у багатьох випадках виявляється недостатнім. Розробка елементів технологій підземної розробки родовищ вугілля, що забезпечують дегазацію і утилізацію газу метану, вимагає додаткових зусиль дослідників. Необхідно вдосконалення способів боротьби з газом на основі закономірностей дезінтеграції гірських порід і пов'язаних з ними нерівномірних і періодичних процесів емісії газу метану в гірничі виробки при веденні очисних робіт.

Забезпечення стійкості систем підтримання гірничих виробок, а, отже, і зниження ризиків виникнення аварійних і травмонебезпечних ситуацій можливе шляхом забезпечення моніторингу параметрів стану гірських порід навколо виробок, оцінки приймання рішень за допомогою цифрових інформаційних технологій, обґрунтування геомеханічних параметрів для систем превентивного контролю безпеки ведення гірничих робіт, вироблення практичних заходів щодо підвищення рівня безпеки геотехнічної системи з урахуванням параметрів напружено-деформованого стану масиву гірських порід. Гостро стоїть питання розробки науково-методичного та нормативного забезпечення з комплексної оцінки параметрів геотехнічної системи «породний масив - кріплення», що включає сучасні принципи математичного моделювання геомеханічного і газодинамічного станів породного масиву, нові методи контролю процесів руйну-

вання, способи виявлення зон малоамплітудної тектоніки, методи прогнозування стійкості масиву порід і систем охорони гірничих виробок.

У другому розділі представлені результати досліджень з удосконалення методів ідентифікації параметрів напружено-деформованого стану порушеного гірничими роботами обводненого газонасиченого масиву гірських порід. Породинний масив має складну структуру, виражену шаруватість, проявляє пластичні властивості, особливо при водонасиченні, що і визначає складність опису механічних процесів деформування. Визначено, що складність і багатофакторність таких задач вимагає використання для їх вирішення непружних геомеханічних моделей, які можуть бути реалізовані сучасними комп'ютерними технологіями, заснованими на поєднанні методів механіки суцільного середовища (рішення реалізуються методом скінченних елементів, МСЕ) з теорією граничних станів гірських порід (реалізуються методом початкових напружень, МПН).

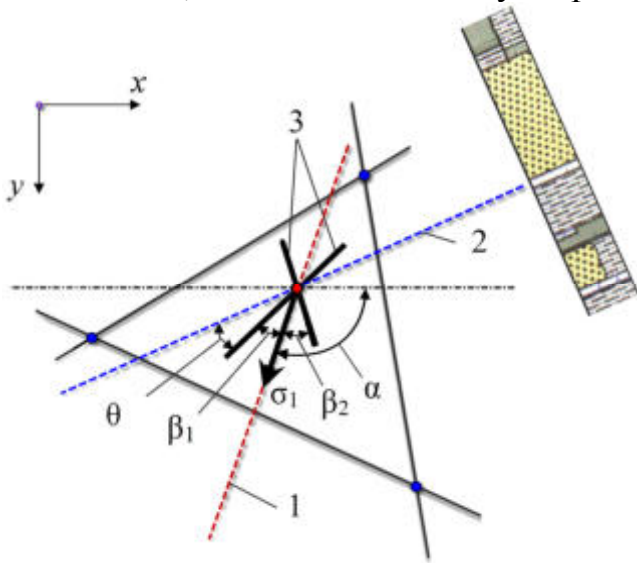
Розроблена математична модель для оцінки умов формування в газонасичених і обводнених пластах зон руйнування гірських порід, в яких активізуються процеси фільтрації метану і води під впливом градієнтів тисків через тріщини в вироблені простори. Модель відрізняється автоматичним розрахунком розриву зв'язків в елементах моделі та спільним урахуванням природних структурних дефектів, орієнтації магістральних тріщин, шаруватості порід, пластових газових тисків, а також наявності води в породах, і включає:

- пружнопластичну модель породного масиву та вдосконалений метод прогнозу зональності і просторової орієнтації техногенних тріщин з урахуванням шаруватості масиву і природних структурних дефектів, оскільки, по-перше, на фільтраційні процеси домінуючий вплив надають тріщинуватість порід і їх відкрита пористість, по-друге, обводнення порід призводить до змін (підвищення) пластичної складової деформацій;

- технологію комп'ютерного моделювання НДС порід з урахуванням внутрішньопластових газових тисків, яка застосовується для глибин нижче зони газового вивітрювання. Метод заснований на первинному визначенні руйнування породного масиву силами гірського тиску і додатковому перерахунку нових розривів зв'язків в елементах моделі під впливом газової складової, яка діє у всіх напрямках рівномірно по закону Паскаля.

Метод розрахунку орієнтації систем магістральних тріщин проілюстрований на рис. 1 і полягає в тому, що в результаті рішення задачі, після виконання процедури МСЕ-МПН і обчислення параметрів НДС породного масиву за значеннями максимальних σ_1 і мінімальних σ_3 головних напружень, а також дотичних напружень τ^{xy} обчислюється орієнтація векторів максимальних головних напружень для кожного елемента розрахункової схеми. У зв'язку з тим, що механізм пластичної деформації зв'язаний зі зрушеннями по площадках ковзання, то в зоні непружних деформацій реалізація умови граничного стану відбувається на двох площадках, нахилених під кутами β_1 та β_2 до вектора максимального головного стискаючого напруження. Враховано, що виникнення нових тріщин відбувається, в основному, по існуючим системам природної тріщинуватості та структурним дефектам у породному масиві. В модель уведені параметри: кут напрямку переважаючих структурних дефектів і кути θ_1 та θ_2 , що характеризу-

ють ступінь впливу структурного дефекту на розвиток тріщин. Знаючи орієнтацію систем додаткових тріщин, визначаються напрямки рухів води, метану та інших газів, що являє небезпеку в процесі ведення гірничих робіт.



1 – напрям максимального головного напруження σ_1 ; 2 – напрями структурних дефектів масиву гірських порід (наприклад, контактів пластів гірських порід, геологічних порушень та ін.); 3 – орієнтація площадок ковзання

Рисунок 1 – Схема до методу визначення орієнтації в породному масиві магістральних тріщин

Методика комп'ютерного аналізу НДС порід з урахуванням надлишкових газових тисків при розміщенні порід заснована на тому, що гірський тиск в породах призводить до їх всебічного нерівнокомпонентного стиснення або розтягування, а газовий тиск діє тільки в порово-тріщинному просторі з однаковою інтенсивністю в усіх напрямках. Міцність порід знижується швидко в залежності від їх крихкості (відбувається розміщення і розвиток магістральних тріщин), в той же час газовий тиск в масиві зберігається на досить високому рівні в залежності від фільтраційної здатності порід. Так як розвиток локальних тріщин не тягне за собою повну втрату несучої здатності, то зруйновані породи мають залишкову міцність і зберігають залишковий рівень напружень. Тиск газу, навпаки, має тенденцію тільки до зниження і прагне до мінімального значення з причини фільтрації газу в вироблені простори і гірничі виробки.

В результаті рішення геомеханічної задачі без урахування тиску газу для кожного елемента моделі обчислюється робота сил гірського тиску. Додаткова робота W_g , що реалізується силами тиску газу при поточному значенні максимальної головної деформації ε_1 , розраховується:

- якщо значення деформації елемента потрапляє в зону розміщення

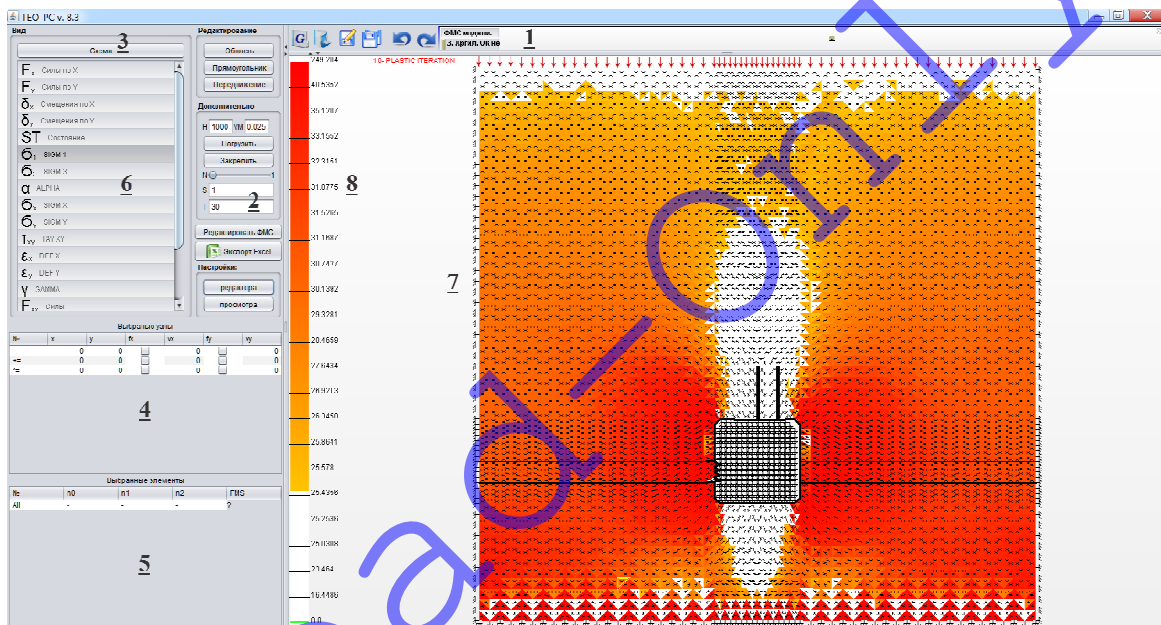
$$W_g(\varepsilon) = \frac{k_\varepsilon}{k_g} (k^{in} - 1) (\varepsilon_1^{lim} (k_g - 1) - 0,5 \varepsilon_1^{lim^2} (0,24 k_g - 2,74) + 0,33 \varepsilon_1^{lim^3} (0,22 k_g - 3,1) - 0,25 \varepsilon_1^{lim^4} (0,81 k_g - 1,17)) \quad (1)$$

де k_g – коефіцієнт $[0...1]$, що характеризує зміну максимальних головних напружень в залежності від коефіцієнта k_ε змін деформації в зоні розміщення; k^{in} – коефіцієнт пластичності породи; ε_1^{lim} – гранична пружна деформація моделі;

- якщо значення деформації елемента потрапляє в зону залишкової міцності, то враховується повна робота сил газового тиску (коефіцієнт k_g у формулі (1) приймається рівним одиниці).

Роботи сил гірського і газового тисків підсумовуються, обчислюється приріст напружень і сил. Приріст сил автоматично розподіляється між вузлами розрахункової схеми шляхом додавання до матриці сил системи, встановлюється ознака продовження ітерацій. Повторення обчислень проводиться до тих пір, поки кожен елемент моделі при розрахованому значенні напруження не матиме деформацію, відповідну деформаційній моделі насиченого газом середовища.

Технологія комп'ютерного аналізу геомеханічного стану породного масиву реалізована в програмному комплексі GEO-RS[®] (рис. 2), який дозволяє моделювати складні гірничо-геологічні умови відпрацювання газо- і водонасичених пластів з різними кутами залягання, підвищити вірогідність прогнозу зон руйнування, порівнювати різноманітні результати прийнятих технічних рішень в режимі реального часу. Результати використовуються для ідентифікації факторів ризику втрати стійкості породного масиву та обґрунтування раціональних параметрів способів і засобів кріплення гірничих виробок.



1 – меню; 2 – швидкий доступ; 3 – управління результатами; 4, 5 – панелі корегування схем; 6 – параметри НДС моделі; 7 – результати; 8 – колірна панель

Рисунок 2 – Програмне забезпечення для ідентифікації параметрів НДС порід

Елементи технології моделювання увійшли в експериментально-аналітичний метод комплексного аналізу стану газонасиченого породного масиву, перевагами якого є визначення серією розрахунків ідеалізованих квазістаціонарних станів насиченого газом породного масиву газопровідних магістральних тріщин, їх верифікація за результатами моніторингу в гірничих виробках і порівняльний аналіз отриманих даних з рішенням серії обернених задач. Для шахтних досліджень використовуються геофізичні методи (електрометричний, віброакустичний, радіометричний та ін.), які в повній мірі апробовані в ІГТМ НАН України і відображені в нормативно-технічній документації.

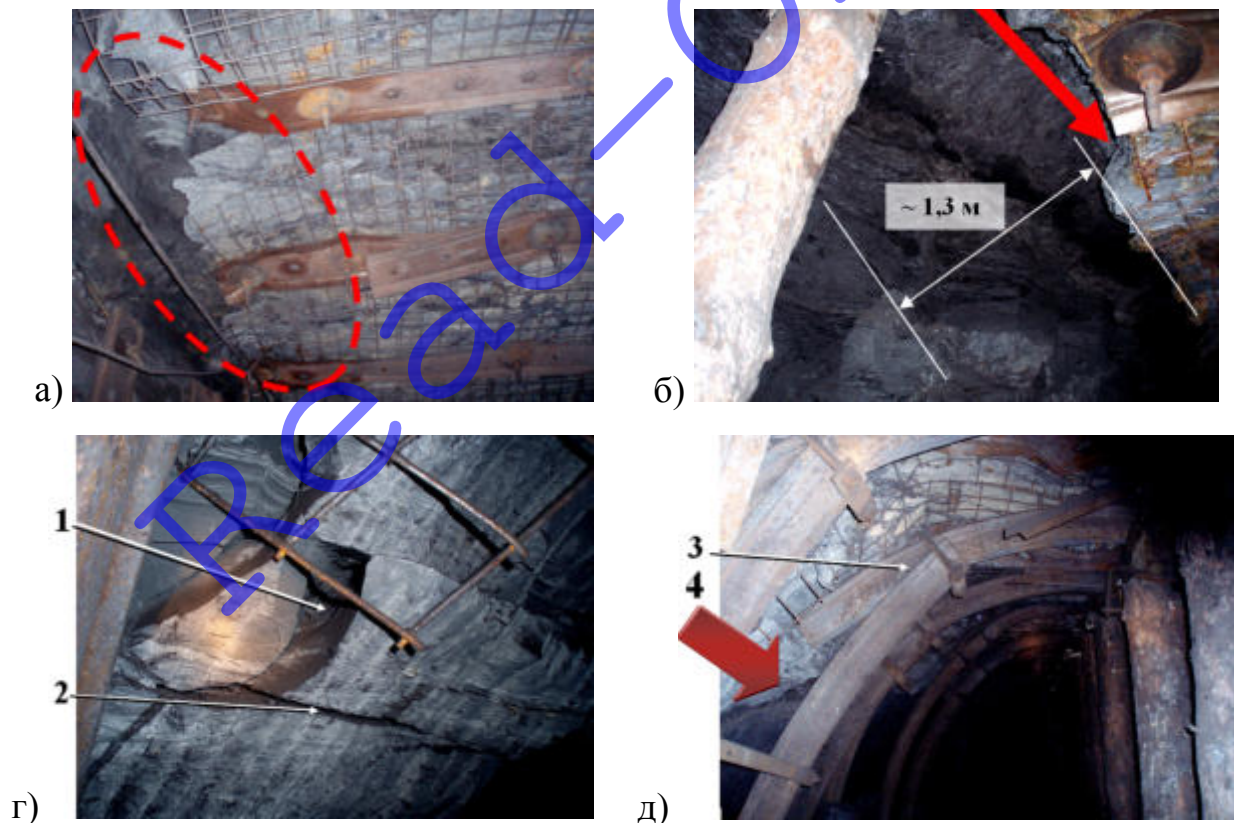
Розроблені методи і технології показали високу ефективність. В результаті впровадження методичних і технічних рекомендацій обґрунтовані: способи

забезпечення стійкості виробок, схеми і способи підземної дегазації (пласти m_3 і l_4 шахти ім. О.Ф. Засядька); метод оцінки деформацій водонасичених порід і надійності систем комбінованого кріплення на пластах C_4 і C_5 шахт Західного Донбасу; способи керування гірським тиском на пласті h_7 шахти «Нестор» та ін.

У третьому розділі представлені результати аналітичних і шахтних досліджень напружено-деформованого стану масиву порід і стійкості анкерних, рамно-арочних і комбінованих систем підтримання гірничих виробок шахт.

Умови шахт Західного Донбасу проілюстровані на прикладі шахти Самарська (рис. 3). Встановлено закономірності руйнування обводнених гірських порід і механізм утворення тріщин. Зростання зміщень покрівлі штреку, закріпленого комбінованим рамно-анкерним кріпленням, в найбільш складних умовах підтримання виробки після проходження очисного вибою відбувається за логарифмічною моделлю (рис. 4), при цьому швидкість зміщень різниться (з боку виробленого простору становить 15-20 мм/добу, по центру – 14-18 мм/добу, з боку цілика – 12-14 мм/добу), що призводить до асиметричності навантаження на систему кріплення та прогресуючого зменшення перетину виробки:

$$\begin{aligned} & \text{з боку виробленого простору} & u &= 43,7 \ln(l) + 301, \text{ мм}; \\ & \text{по центру штреку} & u &= 44,1 \ln(l) + 245, \text{ мм}; \\ & \text{з боку цілика} & u &= 38,6 \ln(l) + 164, \text{ мм}. \end{aligned} \quad (2)$$



1 – віджимання; 2 – тріщини; 3 – руйнування кріплення; 4 – домінуючі зміщення

Рисунок 3 – Небезпечні прояви гірського тиску при водонасиченні порід:

а, б – вивали в верхніх кутах і боках виробки попереду лави;

г, д – тріщинуватість порід і форми втрати стійкості кріплення за лавою

Водонасичення порід підосви має максимальний вплив на стійкість за перші 20 діб (збільшується в 1,5-4,5 рази). Здимання підосви виробки за цей період зростає за лінійною залежністю (при водонасиченні $u=0,026t - 0,08$, $R^2=0,98$, і без водонасичення $u=0,01t - 0,04$, $R^2=0,95$), далі спостерігається зниження інтенсивності і після 60 діб – її стабілізація. Зміцнення підосви виробки дозволяє знизити зміщення на 20-40 % в залежності від об'ємів надходження води і глибини зміцненої зони. Тому для умов глинистих порід потрібні: регламентація надходження води на підосву виробок при технологічних операціях; експлуатаційна оцінка ступеня впливу води на властивості міцності порід; способи зміцнення підосви виробок з урахуванням водонасичення.



Рисунок 4 – Закономірності зміщень покрівлі штреку в зоні обвалення порід (пунктиром показаний середній рівень зміщень верхняків аркового кріплення)

Вплив гірничих робіт на формування напружено-деформованого стану породного масиву при управлінні покрівлею плавним опусканням досліджено на прикладі умов шахти «Нестор». Встановлено закономірності формування поля напружень, зон непружних деформацій і зміщень порід покрівлі під впливом очисних робіт, визначено вплив сил опору кріплення у виробленому просторі на стан основної та безпосередньої покрівлі.

Умови глибоких шахт досліджені на прикладі шахти ім. О.Ф. Засядька. Встановлена логарифмічна модель зростання тріщин у покрівлі пласта m_3 у часі за даними глибинних реперних станцій (рис. 5) на глибинах 1100-1300 м, визначені закономірності розподілу напружень і зон непружних деформацій:

$$\Delta u = 23,4 \ln t + 48,7, \text{ мм}, \quad [0 \div 240 \text{ діб}; R^2 = 0,66], \quad (3)$$

де Δu – розширення тріщин в приконтурній зоні масиву, мм; t – час від оголення покрівлі підготовчої виробки.

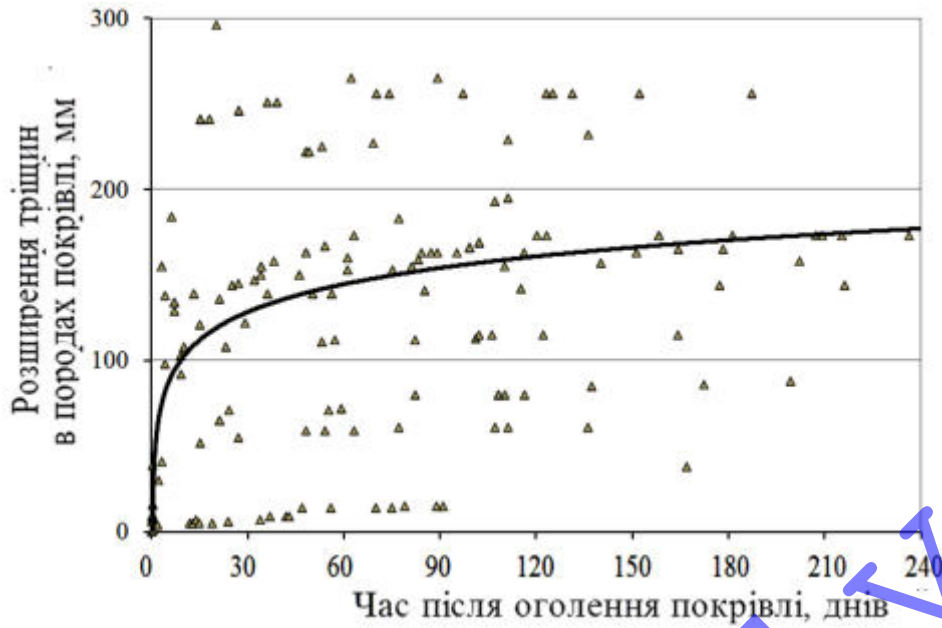


Рисунок 5 – Розширення тріщин в породах покрівлі виробок

Стійкість гірничих виробок в умовах обводнених порід забезпечується рамно-анкерним кріпленням, при якому зміщення і розширення тріщин покрівлі зростають у часі за логарифмічними залежностями з середньодобовою швидкістю в період активних зсувів в 300-500 разів вищою ніж в період сталих зсувів, зростання тріщин в прилеглому до виробки масиві призупиняється через один-два місяці і активізується по межі закріплення анкерів і, навпаки, зростання тріщин в вищележаючому масиві сповільнюється (рис. 6). Величина розширення тріщин безпосередньо в зоні анкерування в три-п'ять разів нижче, чим в вищележачих породах покрівлі, що дозволяє використовувати ефект сприйняття анкерами навантаження для побудови систем комбінованого кріплення з асиметричною піддатливістю і (або) вантажонесучою здатністю.

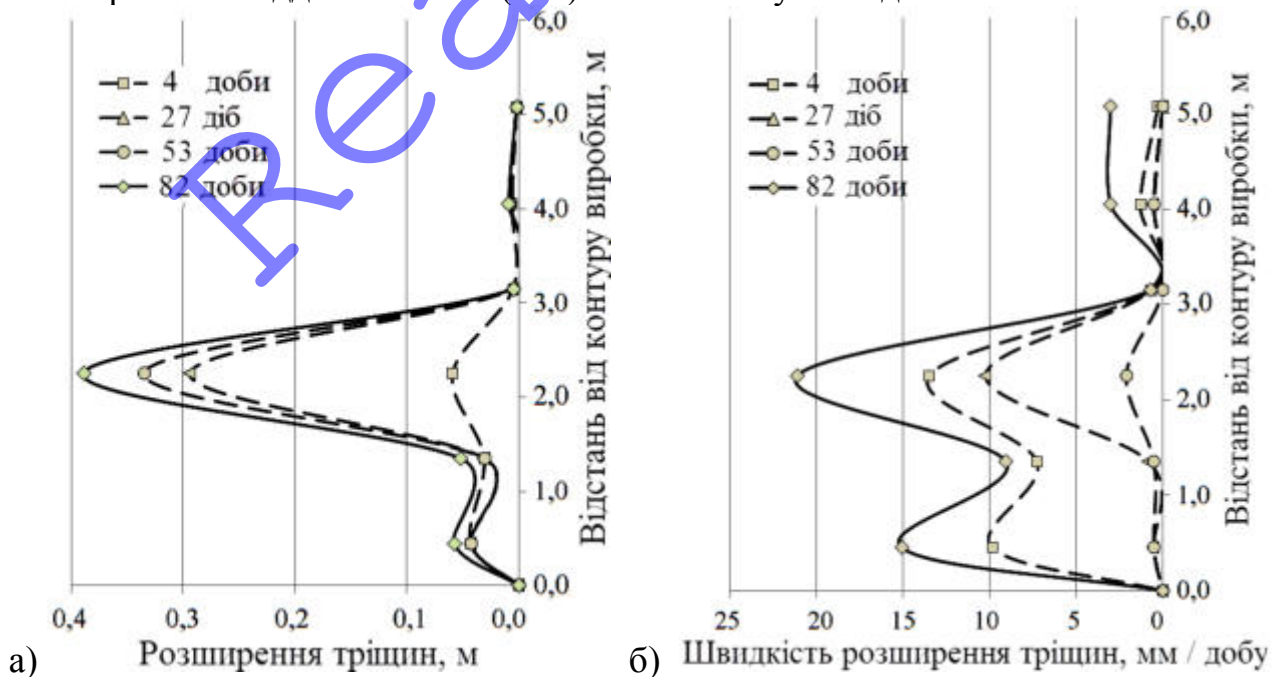
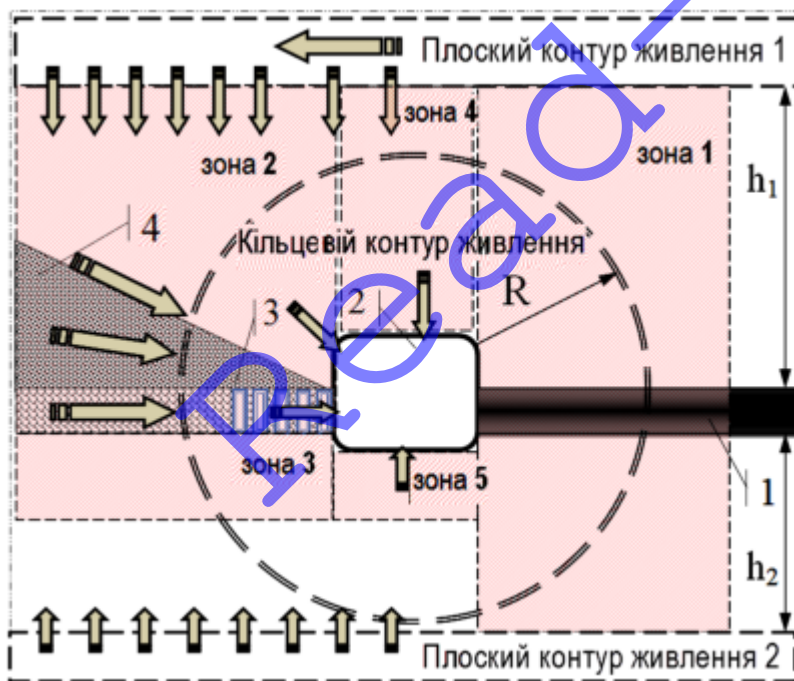


Рисунок 6 – Розширення тріщин в породах покрівлі виробок

Розроблено методичні рекомендації щодо комплексного моніторингу проявів гірського тиску, обґрунтовані силові характеристики системи «кріплення-масив» для умов комбінованого рамно-анкерного способу підтримання конвеєрних і вентиляційних штреків 2-ої і 3-ої західних лав пл. І₄ шахти ім. О.Ф. Засядька з урахуванням тектонічної активності, непружних деформацій і тріщинуватості гірських порід. Результати досліджень увійшли в ряд патентів, методик, рекомендацій, а також в Стандарт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України СОУ 10.1.05411357.010:2014 «Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги».

У четвертому розділі проведена оцінка сумісного протікання геомеханічних та газодинамічних процесів в породному масиві для систем контролю виробничого середовища шахт. Вхідні умови активізації газодинамічних процесів навколо гірничих виробок представлені у вигляді двох основних груп. Перша група чинників визначається наявністю і параметрами джерел газовиділення, які можуть бути представлені як плоскі і кільцеві контури живлення (рис. 7). При цьому контури живлення розуміються як лінії, на яких в період експлуатації гірничих виробок газовий тиск залишається або постійним, або змінюється за певним законом, який не залежить від витрат газу з газоносного пласта або інших джерел. Друга група чинників визначається проникністю гірських порід на шляху фільтрації газів у виробки і різницею тисків на галереї стоку і на контурі живлення досліджуваних інтервалів.



1 - вугільний пласт; 2 - гірнична виробка; 3 - елементи охоронних конструкцій; 4 - вироблений простір; зона 1 - підвищеного гірського тиску (з низькою проникністю); зони 2, 3 - розвантаження в покрівлі (з високою проникністю) і в підшві пласта, відповідно; зони 4, 5 - розвантаження в покрівлі та підшві підготовчої виробки; R - радіус кільцевої зони дренажу; h_1 , h_2 - відстані до контурів живлення в покрівлі та підшві виробки.

Рисунок 7 – Схема до розрахунку параметрів геомеханічних і газодинамічних процесів в шаруватому породному масиві навколо гірничої виробки

У запропонованій математичній моделі, яка реалізується на базі МСЕ, загальна деформація елемента моделі (тензор деформації) описується сумою векторів вузлових переміщень і підрозділяється на кульову і девіаторну частини.

Зміну форми елементів породного масиву в процесі руйнування характеризує девіаторна частина тензора деформацій. Оскільки стисливість частинок скелета мізерно мала по відношенню до загальної стисливості породи, то зміна відносних об'ємів порово-тріщинного простору, а, отже, і його проникності під впливом гірничих робіт відповідає зміні кульової частини тензора деформацій в об'ємі досліджуваного елемента породного масиву, (за винятком ділянок розриву суцільності в зонах безладного обвалення). Об'єднавши співвідношення фільтраційного переносу газів через тріщинуватий масив і виразів для визначення нормальних компонент тензора деформацій, для використання в геоінформаційних системах отримана модель фільтраційного переносу газів з урахуванням напружено-деформованого стану гірських порід під впливом гірничих робіт і довільної орієнтації в геопросторі систем техногенних тріщин. Витрати фільтраційного переносу газів визначаються співвідношеннями:

- для плоских контурів живлення

$$Q = \frac{(m + \varepsilon_1 b^2 \operatorname{ctg} \xi) (\sin^2 \varpi \cos^2 \theta + \cos^2 \varpi) F \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_1} \right)}{24 l \mu}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

- для кільцевих контурів живлення

$$Q = \frac{(m + \varepsilon_1 b^2 \operatorname{ctg} \xi) (\sin^2 \varpi \cos^2 \theta + \cos^2 \varpi) \pi h \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_a} \right)}{12 \mu \ln \frac{R}{r}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5)$$

де m – природна відкрита пористість, відн. од.; b – розкриття системи тріщин, м; $\operatorname{ctg} \xi$ – параметр, що визначає закон пластичної течії (при $\xi = \pi/4$ – течія рівнооб'ємна); F – площа фільтруючої поверхні, м²; ϖ – кут падіння системи тріщин, град.; θ – кут між заданим напрямом фільтрації і простяганням даної системи тріщин; μ – динамічна в'язкість газу, Па·с; l – довжина шляху фільтрації, м; R, r – радіуси контурів дренажування і розвантаження, м; p_1, p_2 – тиск на початку та в кінці інтервалу, Па; ε_1 – максимальні головні деформації, які обчислюються процедурами МСЕ за формулами механіки гірських порід:

– для зон пружного деформування::

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left((\varepsilon^x + \varepsilon^y) + \sqrt{(\varepsilon^x - \varepsilon^y)^2 + 4\gamma^{xy^2}} \right), \quad (6)$$

де $\varepsilon^x, \varepsilon^y$ – компоненти тензора деформацій по координатним осям x і y (з рішення матриці жорсткості системи МСЕ); γ^{xy} – деформації поперечного зсуву;

– для зон непружного деформування граничні максимальні головні деформації $\varepsilon_1^{\lim}$, виражені через межу міцності і фізико-механічні властивості породи:

$$\varepsilon_1^{\lim} = \frac{\sigma_1^{\lim} (1 - \nu^2)}{E \left(1 + \nu \operatorname{ctg} \xi - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\operatorname{ctg} \xi + \nu) \right)}, \quad (7)$$

де $\sigma_1^{\lim}$ – граничні максимальні головні напруження, МПа; E – модуль пружності, МПа; ν – коефіцієнт Пуассона; φ – кут внутрішнього тертя, град.

Отримані співвідношення (4), (5) встановлюють взаємозв'язки параметрів геомеханічного процесу (деформаціями порід, кутами падіння і простягання систем тріщин) з параметрами газодинамічного процесу (інтенсивністю, витратами і напрямками переміщення газів), справедливі для плоских і кільцевих контурів живлення і можуть бути інтегровані в інформаційні системи превентивного контролю стану виробничого середовища шахт. Прогноз показників геомеханічних і газодинамічних процесів дозволяє розрахувати ймовірність виникнення проявів небезпечних факторів (базового параметра для систем безпеки), попередити персонал і вжити заходів для запобігання несприятливих подій.

Аналіз характеру змін мінімальних головних деформацій в породах покрівлі очисного вибою і формування зон різної проникності (рис. 8) показав, що з боку вугільного пласта в зоні опорного тиску породи основної покрівлі знаходяться в стані переущільнення і їх газопроникність низька, а в інтервалі -10 ... + 20 м від конвеєрного штреку вони, навпаки, мають максимальний коефіцієнт розущільнення і значні руйнування. Тому в цій зоні газопроникність велика і може сприяти або акумуляції газу, або його міграції в будь-якому напрямку.

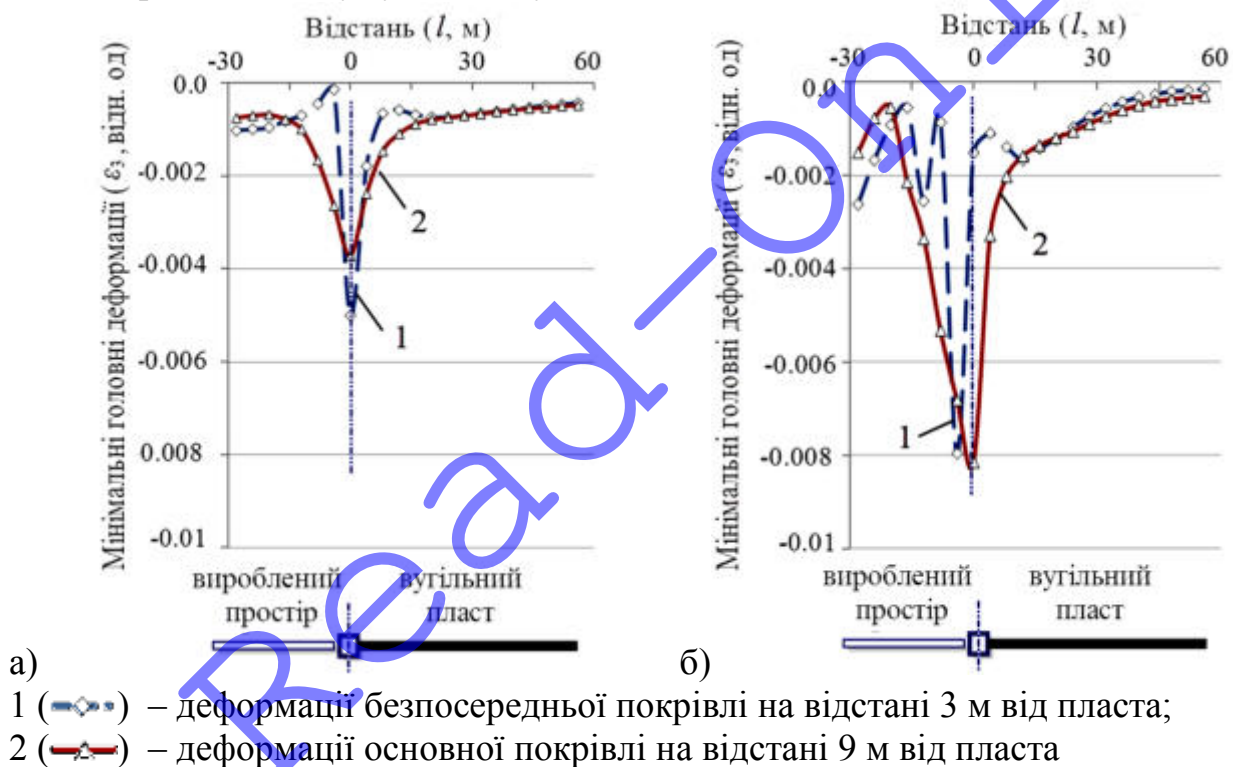


Рисунок 8 – Зміни мінімальних головних деформацій покрівлі (об'ємів поровотріщинного простору) в процесі відпрацювання вугільного пласта: а – на рівні вибою лави; б – 30-70 м після проходження лави і осідання основної покрівлі

Шарувата покрівля при відпрацюванні вугільного пласта досліджена на прикладі реальних властивостей гірських порід в умовах відпрацювання вугільного пласта m_3 з відкладень геологічної свити середнього карбону, які представлені різними за потужністю шарами пісковиків, алевролітів і аргілітів (рис. 9). Виділено три основні зони, що впливають на газоперенесення: зона безладного обвалення за лавою, де рух газових потоків необмежений у всіх на-

прямках (зона високої проникності); зона непружного деформування при нерівнокомпонентному стисненні, де газоперенесення відбувається в магістральних тріщинах; зону підвищеного гірського тиску перед лавою (низької проникності), де пори стиснуті, внаслідок чого газопроникність порід низька.

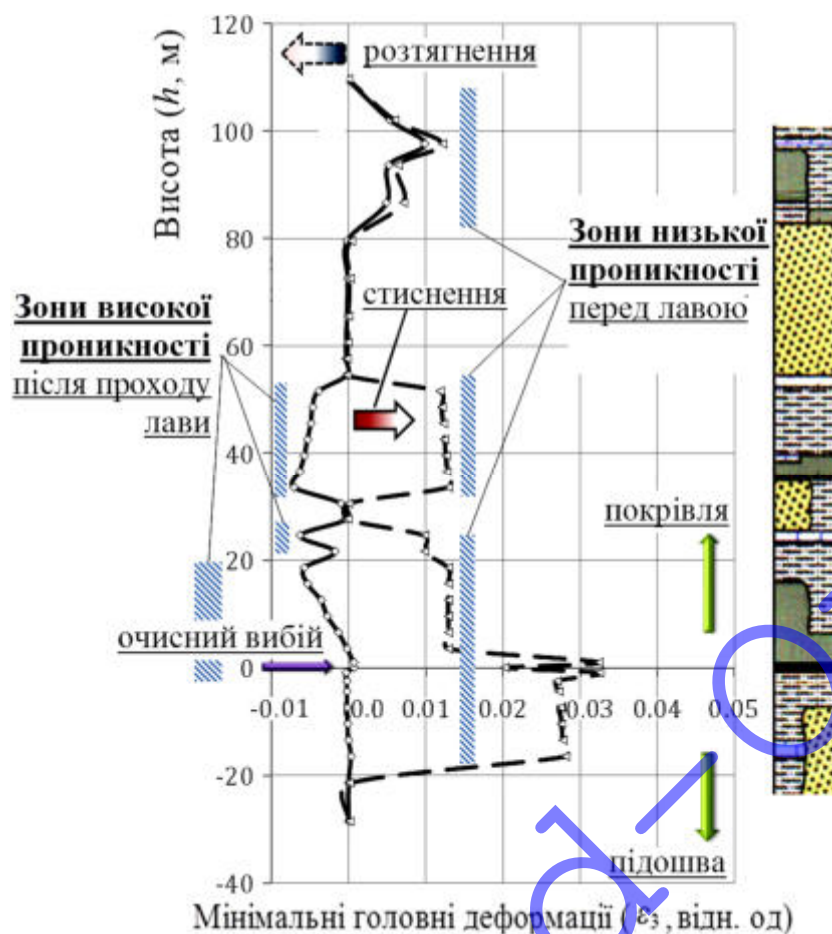
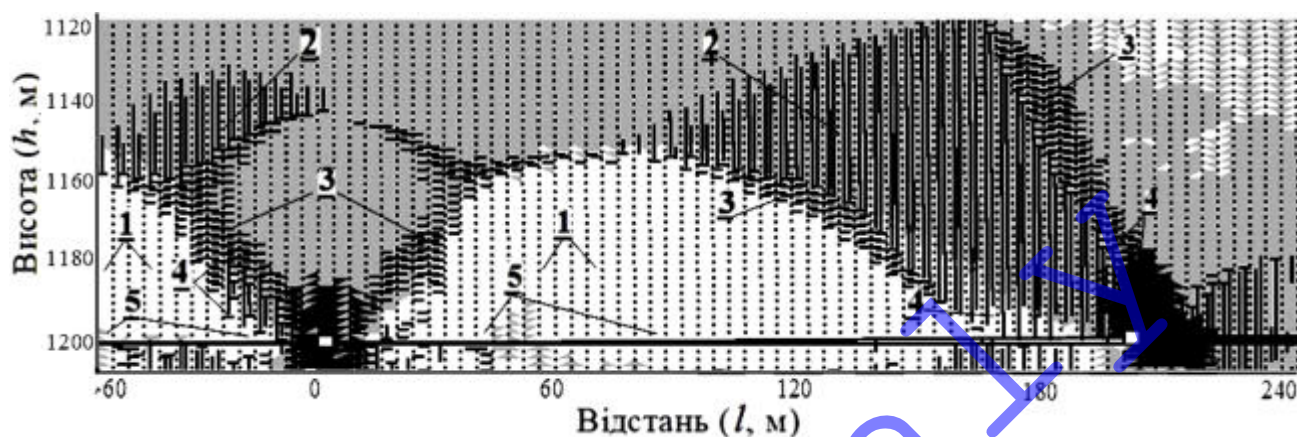


Рисунок 9 – Прогноз змін порово-тріщинного простору в шаруватому породному масиві на границі суміжних лав, що визначені по змінам мінімальних головних деформацій ε_3 шарів покрівлі і підшви в процесі відпрацювання виїмкового стовпа

Деформаційні процеси в породному масиві впливають на структуру і об'єми порово-тріщинного простору, формують області газового живлення. В результаті аналітичних досліджень визначені шляхи переміщення газових потоків з областей живлення в виробки виїмкової дільниці, а також напрями двох систем магістральних тріщин, що виникають при відпрацюванні суміжних лав (рис. 10). Як показано на діаграмі поперечного перерізу виїмкового стовпа, системи близьких до горизонтальних тріщин поширюються в основній покрівлі над очисним вибоєм, де утворюють додаткові розриви суцільності масиву. На базі отриманих параметрів систем магістральних тріщин техногенного походження і кульової частини тензора деформацій для систем контролю виробничого середовища шахт встановлені закономірності змін розташування, форми і об'ємів порово-тріщинного простору на різних етапах відпрацювання суміжних лав. На рис. 11 показані взаємозв'язки змін максимальних головних напружень та об'ємів порово-тріщинного простору в процесі відпрацювання лави.

З точки зору змін фільтраційних здібностей масиву гірських порід областей, що порушена гірничими роботами, розділена на шість основних зон (зони I-VI, рис. 11). Області вироблених просторів відпрацьованих лав характеризуються низькими напруженнями (зони I і IV). Разом з тим, максимальні голов-

ні напруження в зонах розвантаження першої і суміжної лав над зонами безладного обвалення різні. Напруження на рівні основної покрівлі над першою лавою складають 5...10 МПа, над суміжною – 10...20 МПа. Відмінність пов'язана з розширенням зон непружних деформацій над виробленими просторами з плином часу і реологічними процесами. У зоні впливу конвеєрного штреку зона підвищеного гірського тиску зберігається (коефіцієнт концентрації напружень становить 1,5...2,5), що пояснюється роботою засобів кріплення.



1 – зони розвантаження; 2 – ортогональні пласту системи тріщин; 3 – переважно горизонтальні системи тріщин сколювання; 4 – формування блочних структур в зоні обвалення; 5 – зони безладного обвалення

Рисунок 10 – Розвиток систем тріщин при відпрацюванні суміжних лав

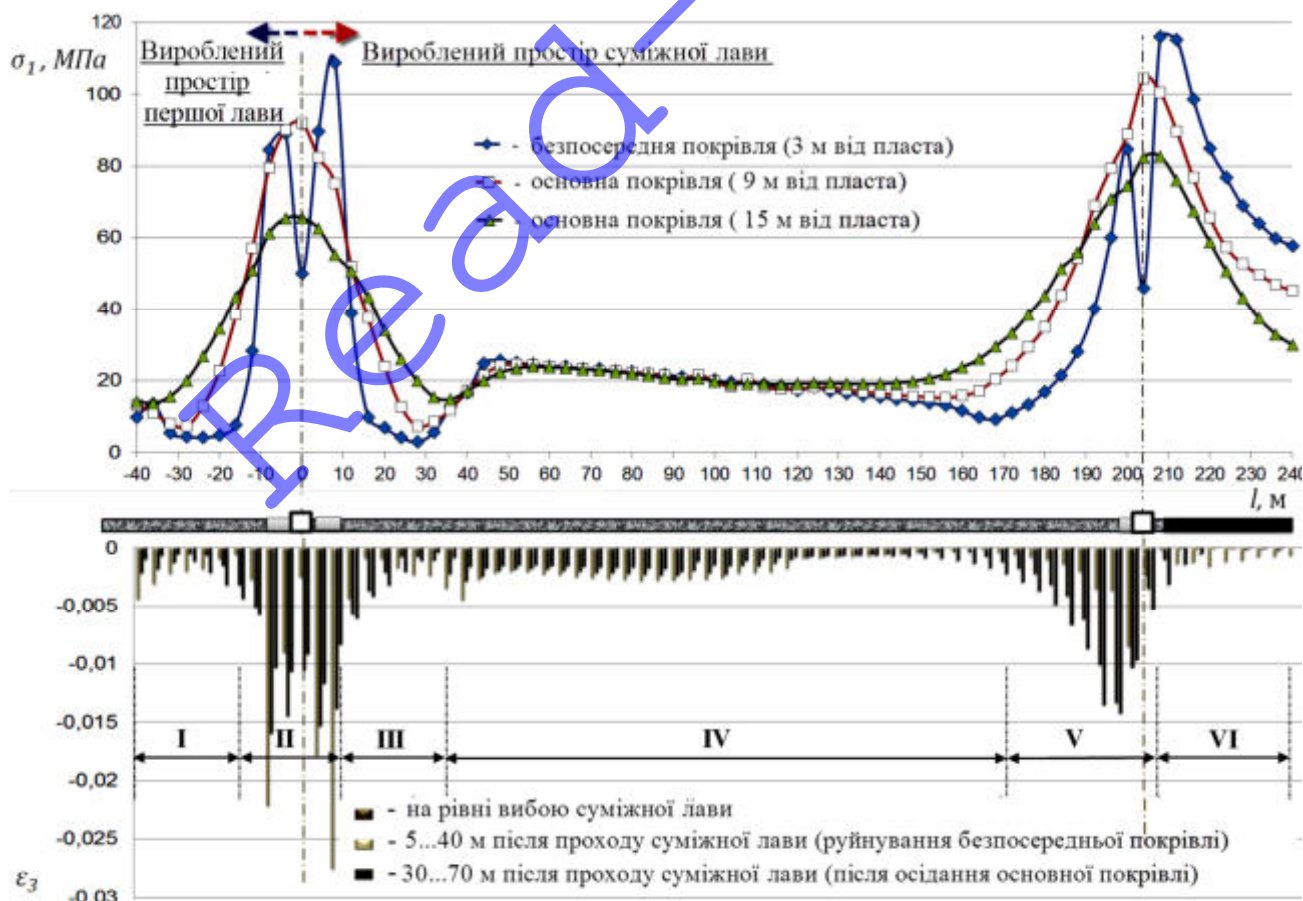


Рисунок 11 – Розвиток систем тріщин при відпрацюванні суміжних лав

Встановлено, що параметром ідентифікації рівня безпеки гірничих виробок по газовому фактору є об'єм емісії газу метану, визначений з урахуванням головних напружень і деформацій, поширеності зон непружних деформацій, а також змін об'ємів порово-тріщинного простору під впливом гірничих робіт, які в процесі відпрацювання лави збільшуються на 70...90 % в умовах зниження максимальних головних напружень на 60...80 %, при цьому витрати фільтраційного переносу газів через гірські породи в виробку прямо пропорційні природній відкритій пористості, мінімальним деформаціям, куту між напрямом фільтрації і простяганням тріщин, різниці тисків на контурі живлення і на галереї стоку, а обернено пропорційні довжині шляху фільтрації для плоских контурів живлення та радіусу дренажу для кільцевих контурів живлення.

Досвід практичної експлуатації дегазаційних свердловин при стовпових системах розробки показав, що інтенсивне газовиділення в свердловини відбувається тоді, коли виїмковий стовп примикає до виробленого простору раніше відпрацьованої лави. Схеми дегазації покрівлі, в такому випадку, передбачають буріння свердловин назустріч очисному вибою з розворотом на вироблений простір, по осі вентиляційного штреку і на цілик вугілля. Збільшення або зменшення відстаней між свердловинами і зміна їх напрямків робить позитивний або негативний вплив на роботу як дегазаційних свердловин, так і технологічної схеми дегазації в цілому. Кути підйому і розвороту позначаються на ефективності дегазації, стійкості стінок свердловин, часу їх роботи (особливо для свердловин, пробурених назустріч працюючій лаві), об'ємах бурових робіт, на залученні в роботу тих чи інших джерел газовиділення.

Ефективність роботи газових свердловин, як показав аналіз близько 200 свердловин на шахті ім. О.Ф. Засядька, залежить від розташування зон руйнування в основній покрівлі на границі відпрацьованої і працюючої лав. Геомеханічний стан породного масиву в зоні дії дільничних дегазаційних свердловин змінюється в просторі і у часі. Ці зміни впливають на руйнування локальних і протяжних ділянок масиву, що, в свою чергу, істотно змінює зміст метану в дегазаційних свердловинах.

Встановлено, що емісія і концентрація газу метану C в свердловині по довжині штреків l при віддаленні від очисного вибою змінюється за затухаючою квазіперіодичною залежністю (рис. 12) з адитивними функціональними рівняннями і рекомбінантними змінами напружено-деформованих станів перенапружених та розвантажених ділянок породного масиву:

$$C = \sin\left(\pi + \frac{l-3}{0,1l+19,6}\right)(0,2l+13,7)+52,6, \quad \% . \quad (9)$$

Адитивні складові квазіперіодичної функції:

- в зоні сполученого з виробкою відпрацьованого простору

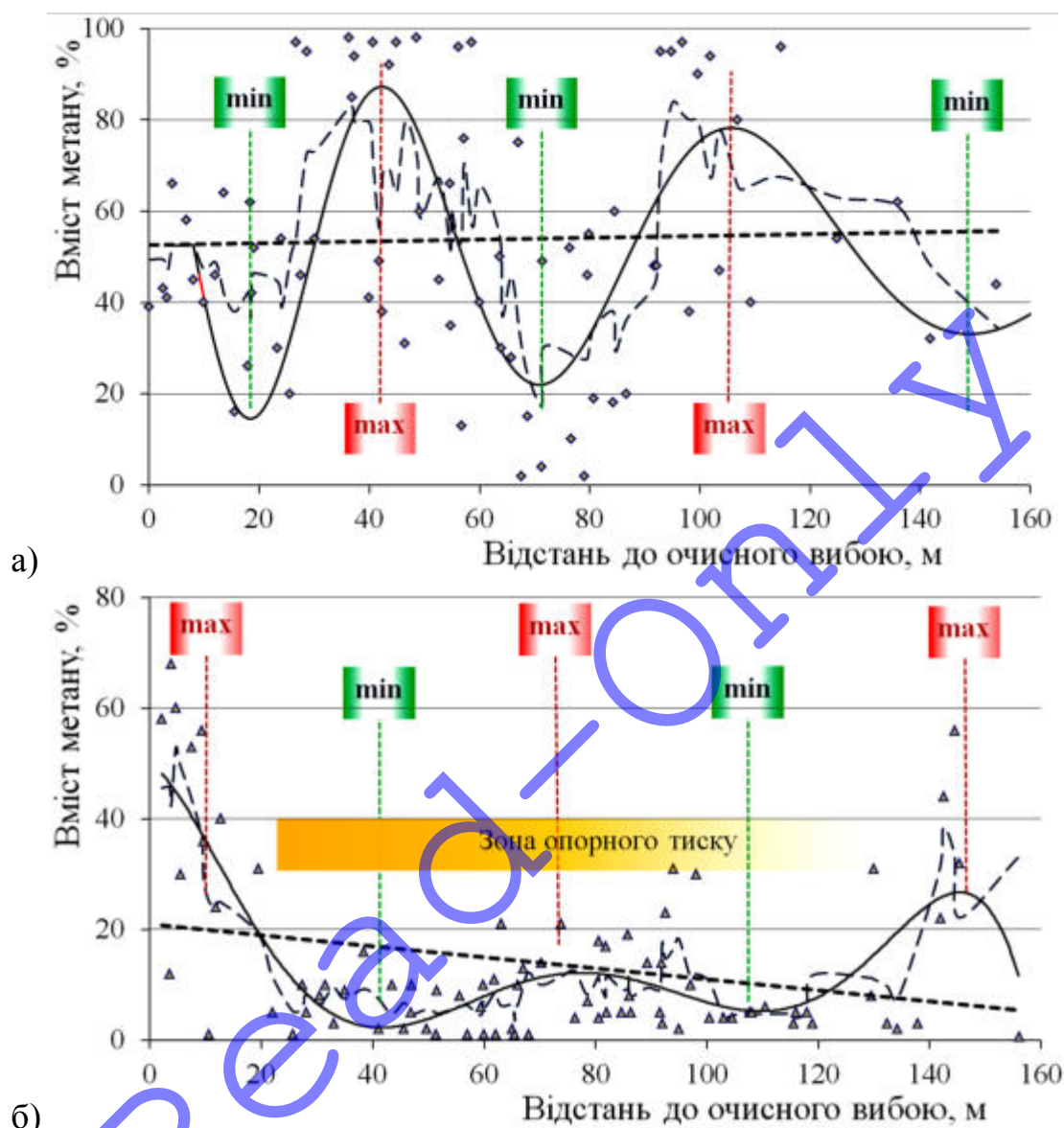
$$C_1 = 0,02 l + 52,6, \quad \% ; \quad (10)$$

- в породах покрівлі над підготовчою гірничою виробкою

$$C_2 = -0,1l + 20,9, \quad \% . \quad (11)$$

Для умов сполученого з гірничою виробкою виробленого простору період збільшується з 59 м до 82 м, амплітуда зменшується до 30 %, адитивна складова

квазіперіодичної функції лінійно зростає, а в породах покрівлі підготовчої виробки, навпаки, лінійно знижується. Це дозволяє визначати зональність ділянок підвищеного газовиділення в виробки та раціональні схеми розташування свердловин для підвищення ефективності дегазації і безпеки гірничих робіт.



1 (♦), 2 (▲) – вміст метану в свердловинах, спрямованих на вироблений простір і уздовж штреку, відповідно, %; 3 (—) – усереднені значення; 4 (---) – тренд зміни вмісту метану (адитивна складова квазіперіодичної функції); 5 (—) – регресійна модель зміни вмісту метану в свердловинах уздовж штреку.

Рисунок 12 – Квазіперіодичність газовиділень в гірничі виробки: а – в зоні виробленого простору; б – в покрівлі підготовчої виробки

Передбачуваний об'єм тріщинуватої зони фільтрації газу довільної форми в області впливу свердловини з різними конфігураціями робочої зони представлений у вигляді добутку сум площ зруйнованих елементів геомеханічної моделі і середніх значень ширини проникних секторів на шляху транзиту газу в свердловину:

$$V_g = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k 2(\bar{R}_{ij} - \bar{r}_{ij}) h_i \frac{\delta_j (\bar{R}_{ij} + \bar{r}_{ij})}{2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{R}_{ij}^2 - \bar{r}_{ij}^2) h_i \delta_j, \text{ м}^3, \quad (12)$$

де $\bar{R}_{ij}, \bar{r}_{ij}$ – середні радіуси секторів зони дренавання і стоку, відповідно, м; $n=L_g/h$ – число інтервалів між горизонтальними перетинами; L_g – досліджувана висота зони дренавання, м; h – висота інтервалу розбивки, м; $k=2\pi/\delta$ – число секторів розбивки кругової зони дренавання; δ – кут розбивки сектора зони фільтрації, рад.

В результаті виконаних досліджень сформульовані принципи і визначені параметри дегазаційних свердловин, які увійшли в галузевий Стандарт України «Дегазація вугільних пластів і вміщуючих порід. Схеми дегазації». Це сприяє: підвищенню рівня безпеки праці гірників при розробці газоносних вугільних пластів; поліпшенню техніко-економічних показників, промислового використання шахтного метану, поліпшенню екологічної обстановки.

У п'ятому розділі обґрунтовані параметри радіометричного контролю безпеки виробничого середовища в гірничих виробках шахт.

У гірничих виробках вміст газу метану і аерозолів радону визначається, перш за все, геомеханічними процесами в породному масиві, оскільки його напружено-деформований стан впливає на проникність порід шляхом фільтрації газів від джерел їх утворення до оголених поверхонь. Для шахтного контролю досить обмежитися дочірніми продуктами розпаду (ДПР) радону, які мають практично значимі еквівалентні рівноважні об'ємні активності (ЕРОА) α -випромінювання (рис. 13).

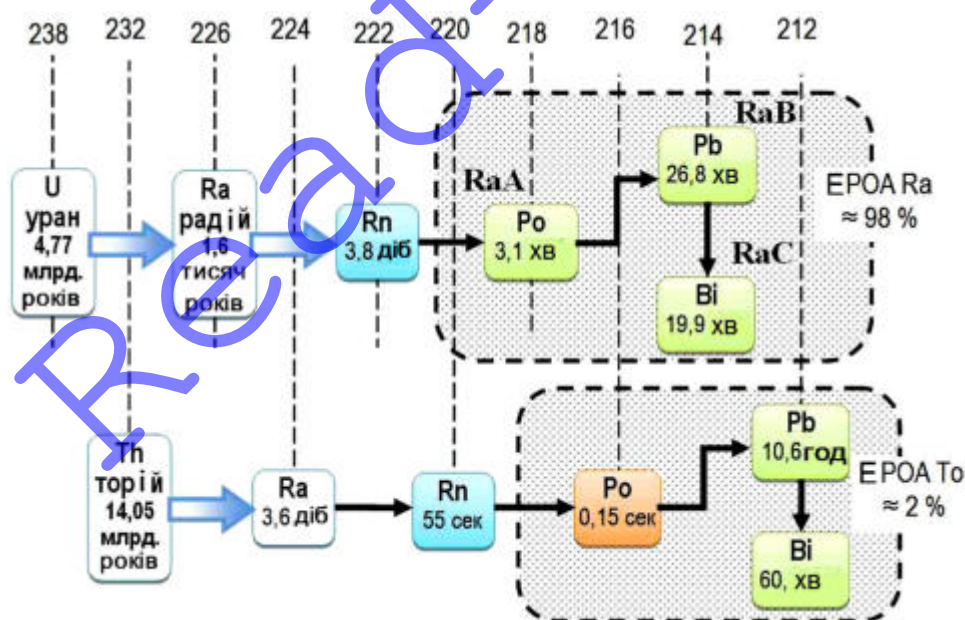


Рисунок 13 – Практично значущі для контролю ізопои α -випромінювань

На базі експериментальних досліджень для умов глибоких горизонтів вугільної шахти встановлені ряд фізичних особливостей емісії в гірничі виробки метану спільно з дочірніми продуктами розпаду радону, а також її зв'язок з утворенням тріщин і руйнуванням гірських порід.

Існує стійкий взаємозв'язок між динамікою змін концентрації метану і наведеною концентрацією ДПР радону (рис. 14) в діапазоні відхилень від середнього значення $\pm 20\%$, при цьому спостерігаються стрибкоподібні сплески наведеної концентрації ДПР радону в діапазоні відхилень 40% і вище, останні обумовлені різними джерелами формування газів метану і радону, різними швидкостями їх переміщення через пори і тріщини в тектонічно порушених зонах масиву, а також динамічними змінами напружено-деформованого стану порід в приконтурній зоні виробок.

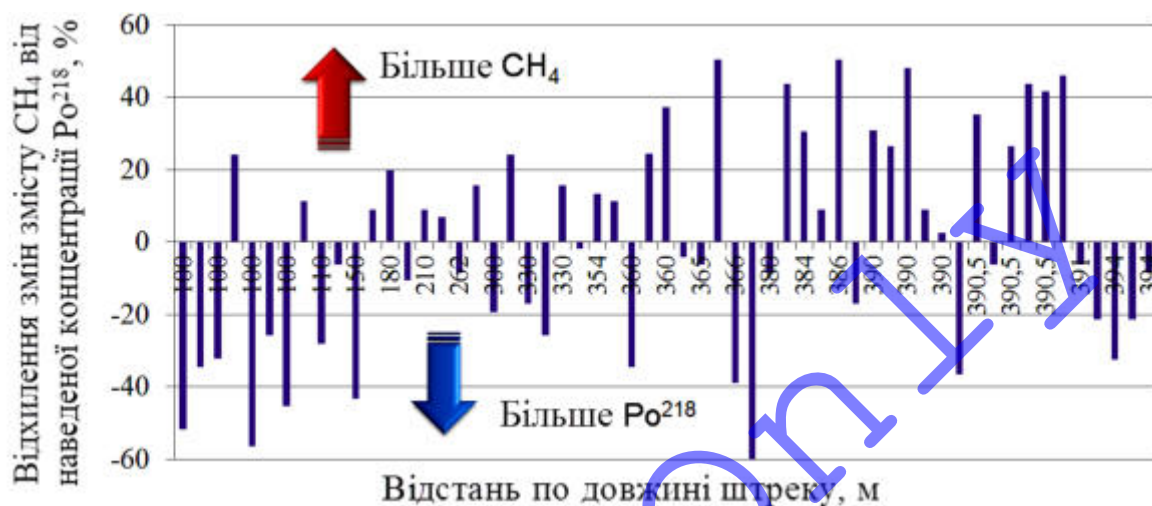


Рисунок 14 – Динаміка відхилень вмісту метану від наведеної концентрації ДПР радону Po^{218} по довжині штреку

Емісія в гірничу виробку короткоживучих α -частинок Po^{218} слабо пов'язана з емісією радіонуклідів Pb^{214} і Bi^{214} , і навпаки, взаємозв'язок між собою цих ізотопів з більш тривалим періодом напіврозпаду досить тісний, що говорить про подібний характер виникнення і емісії в атмосферу гірничої виробки (рис. 15). Взаємозв'язки служать базою для розробки нових методів прогнозу проявів геомеханічних і газодинамічних процесів в гірничих виробках.

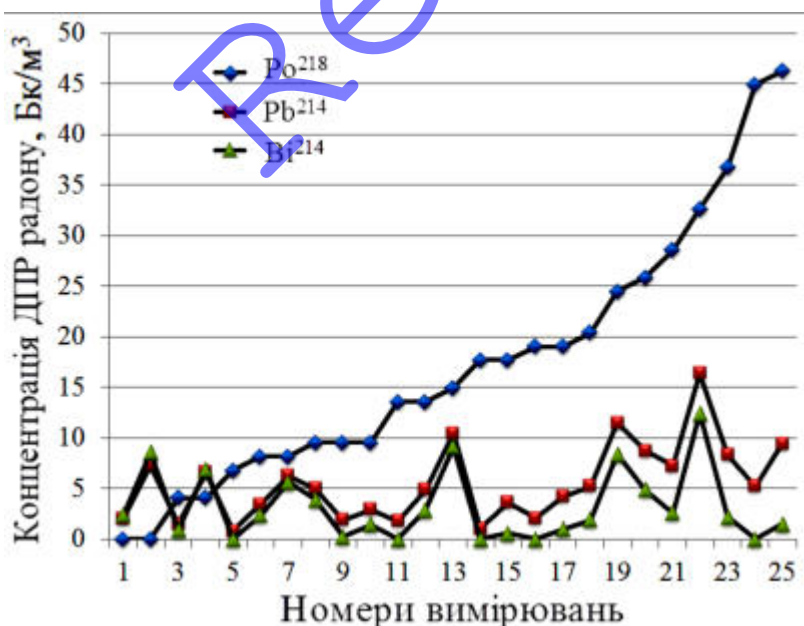


Рисунок 15 – Динаміка змін концентрації дочірніх продуктів розпаду радону в підготовчому вибою

Встановлено, що параметри змін активності α -випромінювань окремих ізотопів радону, концентрацій метану і їх співвідношень можуть бути використані для прогнозу геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві шляхом диференціації в часі змін напружено-деформованого стану порід і порово-тріщинного простору навколо виробок в процесі ведення гірничих робіт. Це пов'язано з закономірностями розпаду ізотопів радону у часі, емісії ДПР радону і газопереносу метану від джерел їх утворення в гірничі виробки, так як, по-перше, зміни концентрації ізотопу Po^{218} з урахуванням часу його розпаду залежить від зміни тріщинуватості приконтурної частини гірських порід (рис. 16). По-друге, зміни відхилень від середнього рівня концентрації ДПР радону залежать від трансформації об'ємів порово-тріщинного простору в процесі ведення гірничих робіт, що дозволяє, при відомих параметрах проникності і фільтрації, прогнозувати зміни стану не тільки приконтурних, а й віддалених зон породного масиву.



Рисунок 16 – Динаміка коливань вмісту метану і наведеної ЕРОА ДПР радону стосовно середнього значення в гірничій виробці

У зоні підвищеного гірського тиску в результаті руйнування гірських порід і розвитку систем тріщин значно переважає кількість короткоживучих ізотопів над довгоживучими. Тобто відбуваються процеси, які супроводжують збільшення інтенсивності гірського тиску. Тому визначення місць інтенсивної еманційної активності ДПР радону дозволяє завчасно виявляти ділянки гірничих виробок з прихованими тектонічними порушеннями і підвищеними концентраціями напружень.

Розроблено методичні рекомендації щодо комплексної оцінки параметрів стану масиву порід, які регламентують основні принципи параметричної ідентифікації геоінформаційними системами спільного протікання геомеханічних і фільтраційних процесів в породному масиві з урахуванням напружено-деформованого стану масиву порід. На базі встановлених взаємозв'язків між

зростанням порушеності приконтурних зон породного масиву і збільшенням в 2-4 рази еманції в атмосферу гірничих виробок аерозолів α -випромінювання Ro^{218} , а також співвідношень проникності порід для метану та інертного газу визначені вхідні дані радіометричного контролю, що застосовуються як індикатори для пошуку магістральних тріщин, зон геологічних порушень і малоамплітудної тектоніки.

У шостому розділі проведена ідентифікація потенційних ризиків проявів гірського тиску в виробках шахт з використанням інформаційних технологій і методів радіометричного контролю.

Систематизовані домінуючі групи факторів ризиків, що пов'язані з геомеханічними процесами в породному масиві і впливають на ризики втрати стійкості систем підтримання гірничих виробок. Для застосування моделі з оцінки ризиків обґрунтовані найбільш ефективні методи прогнозування НДС гірських порід і моніторингу гірничих виробок, що дозволяє ідентифікувати вхідні домінуючі параметри та підвищити безпеку застосування гірничих технологій.

Для керування факторами ризиків, що впливають на втрату стійкості виробок в умовах гірничих виробництва та призводять до травмування або загибелі персоналу, запропоновано використовувати методи, які базуються на статистично значущій кількості параметрів або визначених закономірностях поведінки породного масиву. Потенційний ризик $R(E^t)$ виникнення аварійної ситуації визначають для кожного з елементів геотехнічної системи, де повний ризик являє собою суму індивідуальних ризиків окремих значень домінуючих інформативних параметрів:

- за значеннями інформативних параметрів в момент часу t

$$R(E^t) = k_1^t R(E_1^t) + k_2^t R(E_2^t) + k_3^t R(E_3^t) + \dots + k_m^t R(E_m^t); \quad (13)$$

- за відхиленнями параметрів від точки рівноваги за проміжок часу Δt

$$R(E^{\Delta t}) = k_1^{\Delta t} R(E_1^{\Delta t}) + k_2^{\Delta t} R(E_2^{\Delta t}) + k_3^{\Delta t} R(E_3^{\Delta t}) + \dots + k_n^{\Delta t} R(E_n^{\Delta t}); \quad (14)$$

- по швидкості відхилення параметрів за проміжок часу Δt

$$R(E^{v(\Delta t)}) = k_1^{v(\Delta t)} R(E_1^{v(\Delta t)}) + k_2^{v(\Delta t)} R(E_2^{v(\Delta t)}) + \dots + k_k^{v(\Delta t)} R(E_k^{v(\Delta t)}), \quad (15)$$

де $R(E^t)$, $R(E^{\Delta t})$, $R(E^{v(\Delta t)})$ – потенційні ризики виникнення аварійної ситуації в одному з елементів геотехнічної системи, відносна одиниця; $R(E_m^t)$, $R(E_n^{\Delta t})$, $R(E_k^{v(\Delta t)})$ – ризики, визначені за значенням інформативних параметрів в момент часу t ; відхилень і швидкостям відхилень параметрів геотехнічної системи від точки рівноваги для груп з m , n і k факторів, відповідно, відн. од.; k_1^t , k_2^t , ..., k_m^t ; $k_1^{\Delta t}$, $k_2^{\Delta t}$, ..., $k_n^{\Delta t}$; $k_1^{v(\Delta t)}$, $k_2^{v(\Delta t)}$, ..., $k_k^{v(\Delta t)}$ – нормалізовані коефіцієнти впливу на ризик окремих факторів в групі (нормовані в діапазоні від 0 до 1).

Звичайна міра ризику для окремого класу факторів, наприклад, для фактору зниження міцності обводнених гірських порід (один з наслідків процесу обводнення), визначається тільки наслідками від цього процесу:

$$R(\sigma^w) = P^w k^t (\Delta \sigma_e^{*w}), \quad (16)$$

де P^w – ймовірність обводнення гірських порід, відн. од; k^t – коефіцієнт впливу на потенційний ризик відносного зниження міцності обводнених гірських порід, відн. од.; $\Delta\sigma_e^{*w}$ – відносні зміни міцності при обводненні

$$\Delta\sigma_e^{*w} = 100 \sigma_e^{*w} / \sigma_e^*, \quad \%, \quad (17)$$

де σ_e^* , σ_e^{*w} – межі міцності на стиснення у сухому і водонасиченому стані, Па.

З використанням кількісного методу, що базується на статистично значущій кількості параметрів, визначені параметри зниження міцності гірських порід та залежності зміни ризиків, що виникають внаслідок обводнення породного масиву (рис. 17). Ризики зниження міцності гірських порід від впливу фактора обводнення в діапазоні глибин 400-1200 м лінійно зростають з інтенсивністю 0,62...0,71 – для аргілітів, 0,49...0,58 – для алевролітів, 0,25...0,37 – для пісковиків. Це дозволяє визначати ризики виникнення небезпечних станів породного масиву при різних глибинах залягання та рівнях водонасиченості порід.

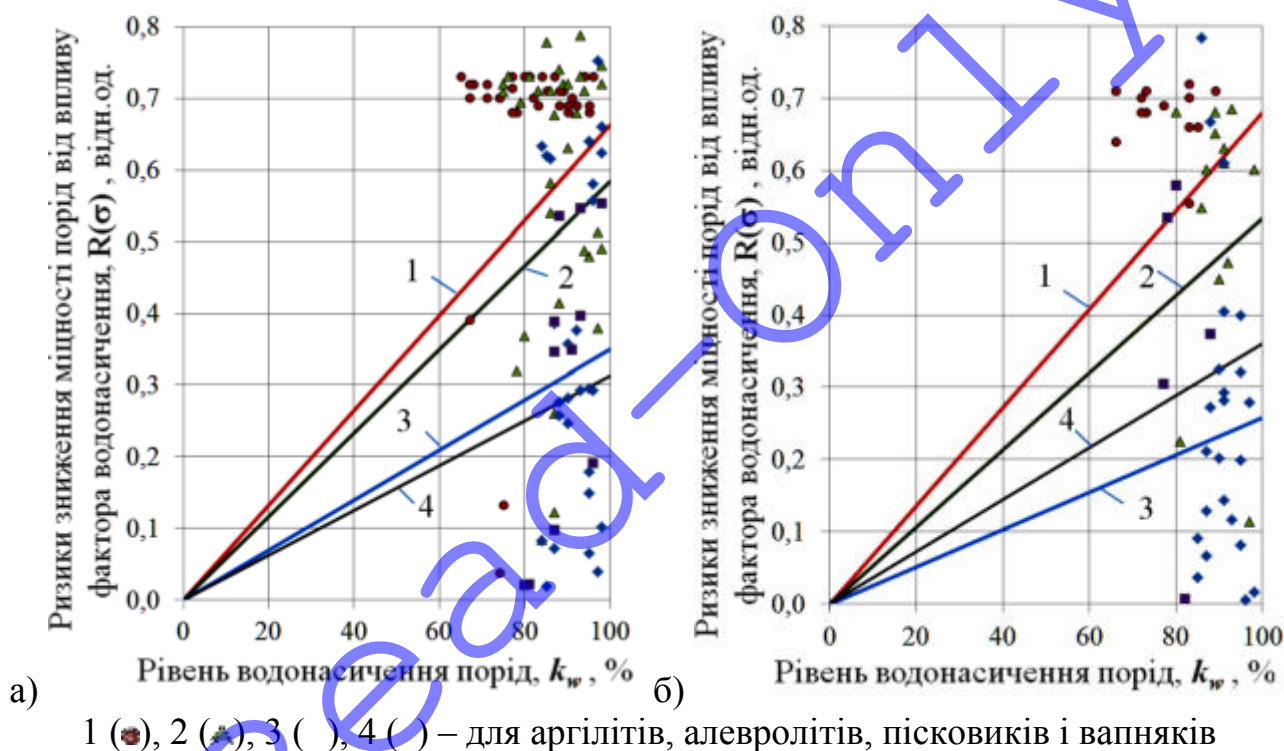
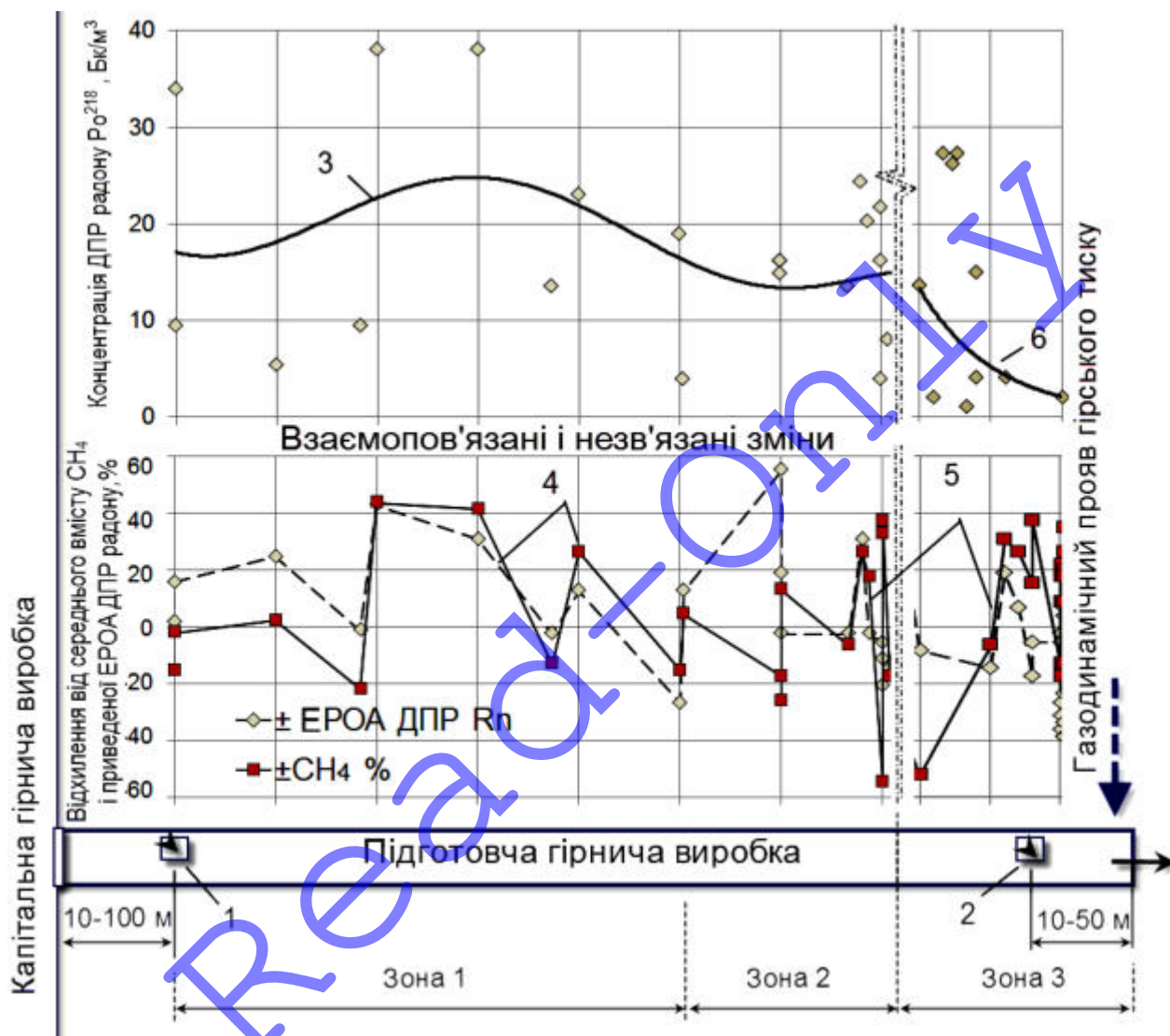


Рисунок 17 – Ризики зниження міцності гірських порід від впливу фактора обводнення для глибин 400-600 м (а) і 1000-1200 м (б)

Розроблено метод і підтверджено патентом спосіб комплексної оцінки потенційно небезпечних станів масиву порід методом радіометричного контролю, які відрізняються ідентифікацією синхронних і асинхронно протифазних в діапазоні 0...20 % або хаотично стрибкоподібних в діапазоні вище 20 % одночасних змін інтенсивності відхилень від середнього значення величин концентрації метану і параметрів наведеної еквівалентної рівноважної об'ємної активності емісії дочірніх продуктів розпаду радону в газоповітряному середовищі виробок (рис. 18). Спосіб реалізується шляхом одночасного вимірювання в газоповітряному середовищі на початку і в кінці виробки інтенсивності відхилень від середнього значення величин концентрації метану і параметрів наведеної

ЕРОА ДПР радону та аналізу цих параметрів. Синхронні зміни параметрів вказують на безпечні трансформації напружено-деформованого стану масиву, а асинхронно протифазні або хаотично стрибкоподібні – на потенційну небезпеку газодинамічних проявів гірського тиску. Зниження цих параметрів нижче 5% від середнього значення визначає закриття тріщин в зонах підвищених концентрацій напружень і служить індикатором готовності породного масиву до динамічних проявів гірського тиску.

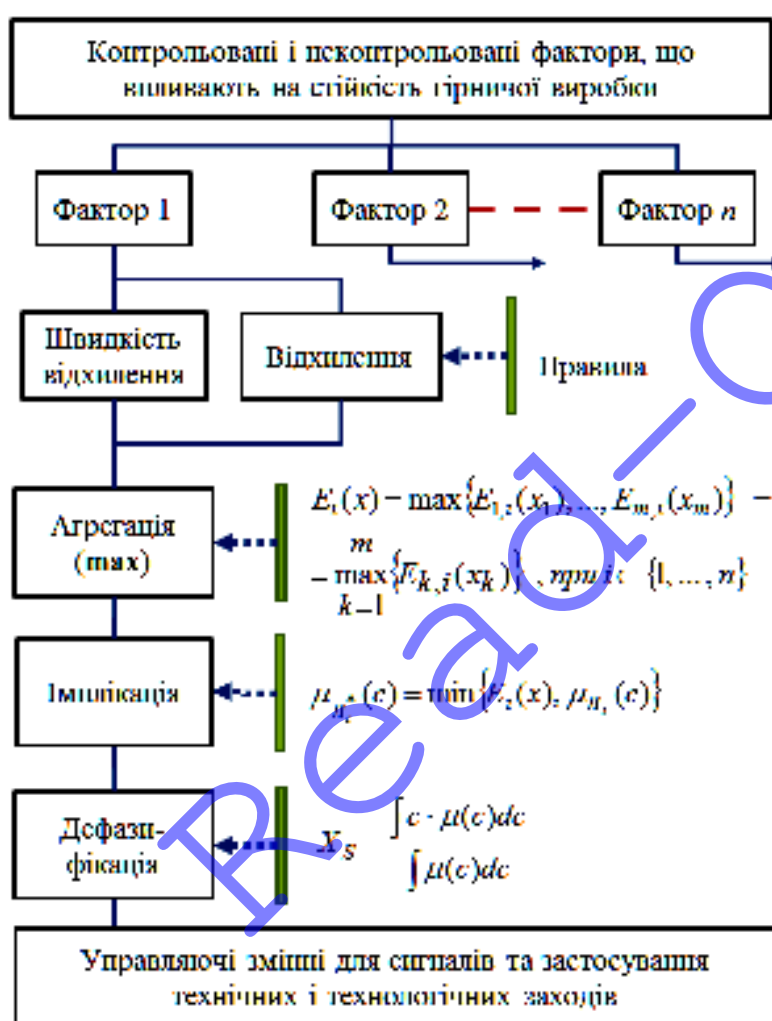


1, 2 – датчики в дальній і в ближній зонах від точки можливого газодинамічного явища; 3 – середні значення ДПР радону Po^{218} ; 4 – взаємопов'язані зміни ЕРОА ДПР радону і метану (зона 1); 5 – протифазні і хаотично стрибкоподібні зміни ЕРОА ДПР радону і метану (зони 2 і 3) перед газодинамічним явищем; 6 – зниження концентрації ДПР радону Po^{218} перед газодинамічним явищем.

Рисунок 18 – Виявлення небезпечного стану породного масиву на базі інформативних параметрів радіометричного контролю продуктів розпаду радону

Для ризик орієнтованого управління небезпечними процесами втрати стійкості гірничих виробок запропоновано оперувати діапазонами значень па-

раметрів, межі яких можуть бути визначені моніторингом або аналітичними методами на основі імітаційних моделей, а показники ризиків – на основі нечітких моделей. Методами математичної теорії нечітких множин та нечіткої логіки обґрунтовані алгоритми логічного висновку в ієрархічній моделі нечіткої логіки для цифрових систем безпеки гірничих робіт (рис. 19). Для попередження аварійних ситуацій, що викликані втратою рівноваги геотехнічної системи в обстановці невизначеності поведінки породного масиву, обґрунтовані методи фазифікації, інференції і дефазифікації даних. Обґрунтовано застосування методів обробки вхідних сигналів: метод агрегації (об'єднання за належністю до правила); метод імплікації; метод дефазифікації (гравітаційний). Вироблені експертні правила (рис. 20) і сформовано алгоритм нечіткого логічного виводу для управління параметрами геотехнічної системи.



$\mu_B(x)$ – ступінь належності величини x нечіткій множині B ; $E_i(x)$ – ступінь належності, з якої елементарний вираз «Якщо» - частини кожного активного фази-правила є істинним; $i \in \{1, \dots, n\}$ – порядковий номер фази-правила, загальним числом n ; m – загальна кількість елементарних виразів для одного правила; B_i – фази-множина для кожного i -го правила, що визначається при імплікації; X_S – проекція центру мас функції належності вихідної величини на вісь абсцис

Рисунок 19 – Схема ієрархічної нечіткої моделі контролю стійкості гірничої виробки

Рівні безпеки ведення гірничих робіт встановлюють комплексними показниками, які визначають готовність породного масиву до небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів шляхом підсумовування і відбору максимальних значень потенційних ризиків в групах інтегральних показників змін міцності гірських порід, нерівнокомпонентності полів напружень і деформацій, умов початку руйнування, інтенсивності змін небезпечних зон, які визначаються за статистично значущою кількістю параметрів попередніх

подій або за трендами і аналітичними прогнозами подальших подій з залученням моделей нечіткої логіки та експертних правил.

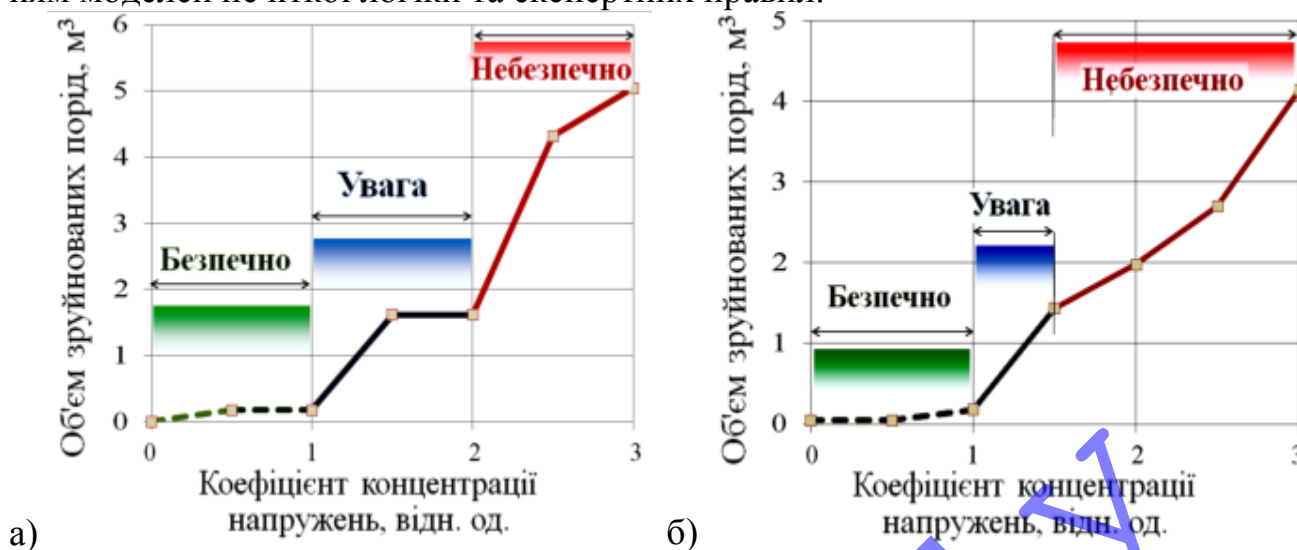


Рисунок 20 – Приклад експертної оцінки небезпечних станів масиву порід при збільшенні напружень в зоні опорного тиску (інформативний параметр - прогнозовані об'єми зруйнованих порід для покрівлі (а) і підосви (б) виробки

Комплексний показник ризиків розвитку небезпечних сценаріїв процесів

$$K_{\Sigma} = k_1 \sum_{i=1}^{n_1} R(K_m)_i + k_2 \sum_{i=1}^{n_2} R(K_d)_i + k_3 \sum_{i=1}^{n_3} R(K_k)_i + k_4 \sum_{i=1}^{n_4} R(K_z)_i, \quad (18)$$

де $n_{1...4}$ – кількість інтегральних параметрів в групах факторів ризику; $R(K_m)$, $R(K_d)$, $R(K_k)$, $R(K_z)$, – ризик виникнення газодинамічного явища від змін міцності гірських порід і газових тисків (група факторів K_m), інтенсивності та нерівнокомпонентності полів напружень і деформацій (група факторів K_d), умов початку руйнування граничнонапружених гірських порід (група факторів K_k), поширеності та інтенсивності змін потенційно небезпечних зон в породному масиві (група факторів K_z); $k_{1...4}$ – нормалізовані ($k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$) вагові коефіцієнти впливу на виникнення газодинамічного явища кожної групи факторів;

- показник поточного контролю ступеня потенційної небезпеки

$$K_{\max} = \max R(K) \begin{cases} R(K_m) = km_1 R_1(K_m) + km_2 R_2(K_m) + \dots + km_{n_1} R_{n_1}(K_m) \\ R(K_d) = kd_1 R_1(K_d) + kd_2 R_2(K_d) + \dots + kd_{n_2} R_{n_2}(K_d) \\ R(K_k) = kk_1 R_1(K_k) + kk_2 R_2(K_k) + \dots + kk_{n_3} R_{n_3}(K_k) \\ R(K_z) = kz_1 R_1(K_z) + kz_2 R_2(K_z) + \dots + kz_{n_4} R_{n_4}(K_z) \end{cases}, \quad (19)$$

де: km , kd , kk , kz – вагові коефіцієнти впливу на потенційний ризик окремих факторів в групі, які нормалізовані в діапазоні $0...1$.

У цьому розділі обґрунтована структура системи дистанційного геомеханічного та радіометричного контролю безпеки виробничого середовища шахт. Зниження ризиків виникнення аварійних і травмонебезпечних ситуацій забезпечується клієнт-серверною системою експертного центру прийняття оперативних рішень з безпеки шахт, в якій завдання і мережеве навантаження роз-

поділені між постачальником і замовниками інформації та використані методи і цифрові технології: віддаленого моніторингу параметрів і збору первинної інформації про стан шахти; обробки і аналізу оперативних подій; формування цільової функції розрахунку локальних і інтегральних показників безпеки з побудовою взаємозв'язків «параметри технології-небезпечний фактор-рівень безпеки»; систематизації інтегральних інформативних параметрів ознак небезпеки виробничого середовища; оптимізації прийнятих рішень шляхом моделювання і експертної оцінки ситуацій, що, у сукупності, дозволяє шляхом інтеграції засобів зв'язку, аналітичної обробки і візуалізації інформації підвищити якість аналізу подій і прийняття рішень з безпеки.

Обґрунтовані принципи побудови та розроблена структура підсистеми управління персоналом для систем віддаленого контролю гірничотехнічних процесів, яка відрізняється розширеними функціональними можливостями використання статистичних обробок комплексу виробничих показників, що дозволяє визначати внесок кожного члена колективу в ефективність виробництва, швидко і адекватно оцінювати виробничі процеси та своєчасно впливати на прийняття управлінських рішень. Розроблено командний інтерфейс, який відрізняється способом прив'язки до функціональних можливостей підсистеми. Кожен вузол структури інтерфейсу прив'язується до об'єктів, а не до програмних класів за звичайною схемою, і фіксує події трьома типами повідомлень: «додався новий вузол» (додався новий об'єкт контролю), «відбулася подія» (контроль зміни стану об'єкта), «сталася помилка» (контроль виходу параметрів об'єкта за межі допустимих значень). Такий підхід дозволяє дізнатися, де саме сталася подія і яка. При цьому, можна знайти джерело помилкових рішень і дій.

Погоджена остаточна редакція галузевого Стандарту України СОУ 10.1.00174088.018:2018 «Система управління виробництвом і охороною праці у вугільній промисловості України», який спрямований на забезпечення безпечного ведення гірничих робіт і охорону праці, покращення результативності управління ризиками, відповідності вимогам Правил безпеки у вугільних шахтах та міжнародних стандартів OHSAS 18001 та ISO 9001.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі геотехнічної і гірничої механіки та охорони праці, у якій дано рішення актуальної науково-технічної проблеми встановлення закономірностей змін напружено-деформованого стану газонасичених структурно-неоднорідних порід під впливом гірничих робіт, емісії газів метану та дочірніх продуктів розпаду радону в гірничі виробки, а також обґрунтування комплексних показників ризиків небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві, на базі яких розроблені методи, методичні рекомендації, способи та програмно-технічні засоби геомеханічного і радіометричного контролю параметрів безпеки виробничого середовища шахт, вдосконалені нормативні документи з безпечного функціонування гірничих виробок і охорони праці, впровадження яких дозволило отримати загальний економічний ефект у сумі

4,8 млн. грн, що має суттєве значення для підвищення безпеки й ефективності експлуатації гірничодобувних підприємств.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Аналіз сучасного стану проблеми забезпечення стійкості гірничих виробок та безпеки праці на гірничодобувних підприємствах показав, що рішення проблем, які пов'язані з геомеханічними та газодинамічними факторами ризику, можливе шляхом забезпечення контролю параметрів стану гірських порід, приймання рішень з використанням геомеханічних параметрів та цифрових технологій превентивного контролю безпеки гірничих робіт, удосконалення гірничих технологій зниження виділення метану в гірничі виробки шахт і його викидів в атмосферу, вироблення практичних заходів щодо підвищення рівня безпеки з урахуванням параметрів напружено-деформованого стану гірських порід. Гостро стоїть питання розробки науково-методичного та нормативного забезпечення, що включає нові методи шахтного контролю процесів руйнування, прогнозування стійкості масиву порід і охоронних систем гірничих виробок.

2. Подальший розвиток отримала математична модель для оцінки зон руйнування в газонасичених та обводнених гірських породах, яка відрізняється спільним урахуванням природних структурних дефектів, магістральних тріщин, шаруватості порід, пластових газових тисків, наявності води в тріщинах і порах, а також визначенням інваріантів компонент головних деформацій, які характеризують зміни форм і об'ємів порово-тріщинного простору де формуються області газового живлення в процесі ведення гірничих робіт.

3. Експериментально встановлено, що стійкість гірничих виробок в умовах обводнених порід забезпечується рамно-анкерним кріпленням, при якому зміщення і розширення тріщин покрівлі зростають у часі за логарифмічними залежностями з середньодобовою швидкістю в період активних зсувів в 300-500 разів вищою ніж в період сталих зсувів, зростання тріщин в прилеглому до виробки масиві призупиняється через один-два місяці і активізується по межі закріплення анкерів і, навпаки, зростання тріщин в вищележачому масиві сповільнюється, при цьому величина розширення тріщин в зоні анкерування в три-п'ять разів нижче, що дозволяє використовувати ефект сприйняття анкерами навантаження для побудови систем комбінованого кріплення з асиметричною піддатливістю і (або) вантажонесучою здатністю.

4. Параметром ідентифікації рівня безпеки гірничих виробок по газовому фактору є об'єм емісії газу метану, визначений з урахуванням головних напружень і деформацій, поширеності зон непружних деформацій, а також змін об'ємів порово-тріщинного простору під впливом гірничих робіт, які в процесі відпрацювання лави збільшуються на 70...90 % в умовах зниження максимальних головних напружень на 60...80 %, при цьому вперше для використання в геоінформаційних системах отримані аналітичні залежності між параметрами геомеханічного і газодинамічного процесів в яких витрати фільтраційного переносу газів через гірські породи в виробку прямо пропорційні природній відкритій пористості, мінімальним деформаціям, куту між напрямом фільтрації і простяганням тріщин, різниці тисків на контурі живлення і на галереї стоку, а оберне-

но пропорційні довжині шляху фільтрації для плоских контурів живлення та радіусу дренажу для кільцевих контурів живлення.

5. Вперше експериментально встановлено, що емісія газу метану в свердловини при віддаленні від очисного вибою змінюється за затухаючою квазіперіодичною залежністю з адитивними функціональними рівняннями і рекомбінантними змінами напружено-деформованих станів перенапружених та розвантажених ділянок породного масиву, при цьому для умов сполученого з гірничою виробкою виробленого простору період збільшується з 59 м до 82 м, амплітуда зменшується до 30 %, адитивна складова квазіперіодичної функції лінійно зростає, а в породах покрівлі підготовчої виробки, навпаки, лінійно знижується, що дозволяє визначати зональність ділянок підвищеного газовиділення в виробки та раціональні схеми розташування свердловин для підвищення ефективності дегазації і забезпечення безпеки ведення гірничих робіт.

6. Вперше запропоновано співвідношення для оцінки передбачуваних об'ємних витрат газу в області впливу свердловин на базі оцінки приросту кульової частини тензора деформацій і об'ємів зруйнованих елементів геомеханічної моделі, яке дозволяє прогнозувати продуктивність газової свердловини з довільною конфігурацією робочої зони.

7. Вперше експериментально встановлено, що емісія в гірничі виробки метану спільно з дочірніми продуктами розпаду радону має стійкий взаємозв'язок між синхронними змінами концентрації метану та наведеною концентрацією дочірніх продуктів розпаду радону в діапазоні відхилень від середнього значення $\pm 20\%$ з асинхронно протифазними сплесками в діапазоні відхилень вище 20% , а інтенсивність росту ізотопів Po^{218} в 2-4 рази перевищує інтенсивність росту ізотопів Pb^{214} і Bi^{214} і лінійно зростає в залежності від відстані до вибою виробки, при цьому емісія в гірничу виробку короткоживучих α -частинок Po^{218} слабо пов'язана з емісією радіонуклідів Pb^{214} і Bi^{214} , і навпаки, взаємозв'язок між собою ізотопів з більш тривалим періодом напіврозпаду Pb^{214} і Bi^{214} досить тісний, що, в сукупності, ідентифікує джерела формування та швидкості переміщення флюїдів через тріщинуватий породний масив.

8. Вперше для умов глибоких горизонтів вугільної шахти встановлено залежність взаємопов'язаних еманцій в гірничу виробку продуктів розпаду радону Pb^{214} і Bi^{214} з утворенням тріщин і динамічними змінами напружено-деформованого стану порід в приконтурній зоні виробок, що дозволяє на базі радіометричного моніторингу виявляти дислокацію новоутворених систем тріщин та небезпечні за газодинамічним фактором зони в гірничих виробках.

9. Подальший розвиток отримав метод оцінки рівнів безпеки ведення гірничих робіт, що відрізняється комплексними показниками, які визначають готовність породного масиву до небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів шляхом сумування і відбору максимальних значень потенційних ризиків в групах інтегральних параметрів змін міцності гірських порід, нерівнокомпонентності полів напружень і деформацій, умов початку руйнування, інтенсивності змін небезпечних зон, які визначаються за статистично значущою кількістю параметрів попередніх подій або за трендами і аналітичними прогнозами подальших подій з залученням моделей нечіткої логіки та

експертних правил, при цьому ризики зниження міцності гірських порід від впливу фактора обводнення в діапазоні глибин 400-1200 м лінійно зростають з інтенсивністю 0,62...0,71 – для аргілітів, 0,49...0,58 – для алевролітів, 0,25...0,37 – для пісковиків.

10. Вперше розроблено метод і підтверджено патентом спосіб прогнозу потенційно небезпечних станів масиву порід методом радіометричного контролю, які відрізняються ідентифікацією синхронних і асинхронно протифазних в діапазоні 0...20 % (маркер безпечних трансформацій напружено-деформованого стану породного масиву) або хаотично стрибкоподібних в діапазоні 20 % і вище (маркер потенційної небезпеки проявів гірського тиску) одночасних змін інтенсивності відхилень від середнього значення величин концентрації метану і параметрів наведеної еквівалентної рівноважної об'ємної активності емісії дочірніх продуктів розпаду радону в газоповітряному середовищі виробок. Зниження цих параметрів нижче 5% від середнього значення визначає закриття тріщин в зонах підвищених концентрацій напружень і служить індикатором готовності породного масиву до динамічних проявів гірського тиску.

11. Отримали розвиток методи функціонування підсистеми управління персоналом і підтримки прийняття рішень, які відрізняються ієрархічною структурою побудови систем контролю гірничотехнічних процесів та розширеними функціями щодо статистичних обробок комплексу виробничих показників. Розроблено командний інтерфейс, який відрізняється способом прив'язки до функціональних можливостей підсистеми. Кожен вузол структури інтерфейсу прив'язується до об'єктів, а не до програмних класів за звичайною схемою, і фіксує події трьома типами повідомлень: «додався новий вузол» (додався новий об'єкт контролю), «відбулася подія» (контроль зміни стану об'єкта), «сталася помилка» (контроль виходу параметрів об'єкта за межі допустимих значень). Такий підхід дозволяє дізнатися, де саме сталася подія і яка. При цьому, можна знайти джерело помилкових рішень і дій.

12. Розроблено і впроваджено ряд методик, рекомендацій, програмного забезпечення та нормативних документів: способів управління силовими характеристиками системи «кріплення-масив» і наукового супроводу технологій дегазації на пластах m_3 і l_4 ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядька», на пластах C_4 і C_5 шахт «Самарська» і «Павлоградська», на пласті h_7 шахти «Нестор»; прогнозу потенційно небезпечних проявів гірського тиску з використанням методу радіометричного контролю; програмного забезпечення з моделювання геомеханічних і газодинамічних процесів, аналізу параметрів енерготехнологічного комплексу, управління персоналом і віддаленого контролю безпеки; галузевого Стандарту України СОУ 10.1.05411357.010:2014. «Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги»; остаточної редакції галузевого Стандарту України СОУ 10.1.00174088.018:2018 «Система управління виробництвом і охороною праці у вугільній промисловості України», який регламентує вимоги до безпечного ведення гірничих робіт та управління ризиками у відповідності з міжнародними стандартами OHSAS 18001 та ISO 9001. Розробки мають соціальний,

екологічний та економічний ефекти. Загальний економічний ефект від впровадження наукових розробок складає 4,8 млн грн.

13. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується: застосуванням апробованих методів механіки гірських порід, механіки суцільного середовища, теорії ризиків, нечіткої логіки і побудови інформаційних систем; обробкою статистично значущого об'єму даних властивостей порід, зміщень і деформацій виробок, параметрів дегазаційних свердловин, емісії продуктів розпаду радону в гірничі виробки; значною кількістю проведених чисельних експериментів по виявленню особливостей напружено-деформованого стану породного масиву; узгодженістю результатів математичного моделювання з натурними даними; позитивними результатами апробації на практиці рекомендацій та елементів цифрових систем контролю параметрів безпеки; впровадженням нормативно-технічних документів з обґрунтованими технічними, економічними і соціальними ефектами.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ТАКИХ РОБОТАХ:

**статті у наукових періодичних виданнях інших держав або України, які
включені до міжнародних наукометричних баз**

1. Slashchov I.M. Features of geomechanical and radiometric safety control of working medium in the mines. *Sciences of Europe*. 2019. № 37(1). pp. 47-53.
2. Slashchova O., Slashchov I., Sapunova I. Specific solution of problem of water filtering in the rocks by the finite element method. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. pp. 93.
3. Slashchov I.M. Stress-strain state of rock massif when using combined support systems in preparatory mine workings. *Danish Scientific Journal*. 2019. № 22(1). pp.57-64.
4. Slashchov I.M. Basic preconditions for development of mine safety systems by using production environment remote control methods. *International independent scientific journal*. 2019. № 3(1). pp. 40-48.
5. Slashchov I.M. Estimation of fracture systems parameters in rock massif by the finite element method. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. pp. 94.
6. Slashchov I.M., Shevchenko V.G, Kurinnyi V.P., Slashchova O.A., Yalan-skyi O.A. Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. № 13(4). pp. 9-17.
7. Slashchov I., Slashchov A., Siromaschenko I., Kurinnyi V., Ikonnikov M. Development of digital technologies for the systems of remote mining safety monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 168. pp. 65.

Статті у наукових періодичних виданнях

8. Курносое С.А., Слащев И.Н. Оптимизация состава стеклопластиковых материалов для изготовления затяжек горных выработок / Зб. наук. праць НГУ. Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2009. № 33. С. 103-110.
9. Практический опыт повышения эффективности угледобычи и безопасности труда в сложных горно-геологических условиях / Слащев И.Н., Курносое

С.А., Слащева Е.А., Филимонов П.Е., Цикра А.А. Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2009. № 11. С. 20-25.

10. Дегазация массива с повторным использованием газосборной выработки / Курносое С.А., Слащев И.Н., Сапегин В.Н., Филимонов П.Е. Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2009. № 83. С. 150-158.

11. Слащев И. Н. Оценка техногенной трещиноватости методами математического моделирования / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2010. № 85. С. 239-250.

12. Курносое С.А., Слащев И.Н., Филимонов П.Е. Использование стеклопластиковых материалов в горном деле / Строительство, материаловедение, машиностроение. Днепропетровск, ГВУЗ ПГАСА, 2010. № 52. С. 187-191.

13. Слащев И.Н. Метод учета избыточных газовых давлений при решении геомеханических задач современными компьютерными технологиями / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2010. № 88. С. 112-118.

14. Слащев И.Н. Прогноз устойчивости систем комбинированного поддержания подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт / Зб. наук. праць НГУ. Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2010. № 35, Том 1. С. 67-77.

15. Промышленные испытания новых способов и средств повышения несущей способности анкерных систем в неустойчивых породах / Слащев И.Н., Курносое С.А., Иконникова Н.А., Филимонов П.Е., Цикра А.А. Зб. наук. праць НГУ. Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2010. № 35, Том 1. С. 111-120.

16. Оценка хаотичности процессов, происходящих в горных технических системах, особенности управления и использования / Яланский А.А., Слащев И.Н., Яланский Ал.А., Иконникова Н.А., Цикра А.А. Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2010. № 91. С. 159-172.

17. Слащев И.Н., Приходченко С.Д., Слащев А.И. Алгоритм и программное обеспечение оценки параметров технологий переработки углесодержащих отходов / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2011. № 92. С. 238-247.

18. Слащев И.Н. Шахтные исследования устойчивости систем поддержания штреков в условиях легкообрушаемых пород Западного Донбасса / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2012. № 97. С. 177-185.

19. Исследование параметров крепи и состояния боков подготовительных выработок / Курносое С.А., Слащев И.Н., Слащева Е.А., Горбачев Г.И., Иванчишин Д.С. Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2012. № 98. С. 262-272.

20. Булат А.Ф., Слащев И.Н. Разработка компьютерных систем математического моделирования геомеханических процессов / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2012. №. 99. С. 16-27.

21. Закономерности пучения почвы в подготовительных выработках / Курносое А.Т., Курносое С.А., Слащев И.Н., Задерий В.В., Горбачев Г.И. / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2012. № 101. С. 105-112.

22. Слащев И.Н. Разработка математической модели и технологии компьютерного анализа тектонически нарушенного структурно-неоднородного по-

родного массива / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2012. № 104. С. 94-109.

23. Слащев И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / Уголь Украины. 2013. № 2. С. 40-43.

24. Оптимизация информационной системы оперативного прогноза геомеханических процессов для поддержки принятия решений по безопасности шахт / Слащев И.Н., Слащев А.И., Шевченко В.Г // Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2013. № 112. С. 129-144.

25. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Слащева Е.А. Взаимосвязи между геомеханическими процессами и эмиссией газа метана и продуктов распада радона в горные выработки угольных шахт / Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2014. № 114. С. 272-286.

26. Слащева Е.А., Слащев И.Н., Яланский А.А. Особенности решения геомеханических задач для условий обводненного газонасыщенного массива горных пород / Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2014. № 115. С. 232-244.

27. Слащев И.Н., Слащева Е.А. Исследование процесса формирования зон разрушения в породном массиве при отработке смежных выемочных участков шахт / Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2016. № 128. С. 179-191.

28. Булат А.Ф., Слащев И.Н. Использование продуктов распада радона как информативных параметров для оценки геомеханического состояния горных пород / Геотехническая механика. Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2017. № 132. С. 3-16.

29. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Слащева Е.А. Комплексирование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт / Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2017. № 134. С. 3-21.

30. Обґрунтування методів і алгоритмів оцінки геомеханічної безпеки ведення гірничих робіт / Булат А.Ф., Слащов І.М., Яланський О.А., Слащов А.І. Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2017. № 135. С. 3-17.

31. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Иконникова Н.А. Принципы построения систем удаленного контроля безопасности шахт / Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2017. № 137. С. 3-17.

32. Разработка новых способов охраны подготовительных горных выработок литыми полосами / Яланский А.А., Слащев И.Н., Слащева Е.А., Селезнев А.М., Арестов В.В. Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2018. № 141. С. 3-17.

33. Слащов І.М., Макеєв С.Ю., Слащова О.А. Методологія оцінки комплексу параметрів стану масиву порід для забезпечення вимог безпеки систем підтримання гірничих виробок / Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2018. № 143. С. 127-142.

34. Підвищення продуктивності газових родовищ через управління напружено-деформованим станом порід привибійної зони свердловин / Бу-

лат А.Ф., Слащов І.М., Слащова О.А., Макеев С.Ю., Рижов Г.А. Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2019. № 144. С. 4-19.

35. Иерархическая модель формализации нечеткого логического вывода для цифровых систем оценки устойчивости горных выработок / Слащев А.И., Слащев И.Н., Осенняя Н.В., Константинова И.Б. Геотехнічна механіка. Дніпро: ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 122-131.

36. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок / Слащов І.М., Слащова О.А., Осінній В.Я., Сапунова І.О., Константинова І.Б. Геотехнічна механіка. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209-222.

37. Булат А.Ф., Слащова О.А., Слащов І.М., Стаднійчук М.М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. Геотехнічна механіка. Дніпро : ІГТМ НАНУ, 2020. № 150. С. 176-187.

Монографії

38. Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ: монография / Иконников М.Ю., Иконников Ю.Р., Слащева Е.А., Слащев И.Н., Яланский А.А.; МОН Украины. Днепропетровск: НГУ, 2015. 215 с.

Статті і тези в виданнях міжнародних конференцій

39. Решение проблемы поддержания горных выработок, расположенных в слабых вмещающих породах / Курносов А.Т., Курносов С.А., Слащев И.Н., Боккий Б.В., Цикра А.А. // Деформ. и разруш. матер. с дефектами и динам. явления в горных породах и выработках : Матер. XIX Межд. науч. школы, Алушта, 21-27 сент. 2009 г. Симферополь : Таврич. нац. ун-т, 2009. С. 187-190. (очна участь)

40. Опыт применения анкерных систем из композитных материалов для повышения устойчивости почвы подготовительных выработок / Курносов А.Т., Курносов С.А., Слащев И.Н., Слащева Е.А., Филимонов П.Е., Цикра А.А. // Деформ. и разруш. матер. с дефектами и динам. явления в горных породах и выработках : Матер. XX Межд. науч. школы, Алушта, 20-26 сент. 2010 г. Симферополь : Таврич. нац. ун-т, 2010. С. 200-203. (очна участь)

41. Геомеханическое обоснование устойчивости почвы выработок / Курносов А.Т., Курносов С.А., Слащев И.Н., Слащева Е.А. // Деформ. и разруш. матер. с дефектами и динам. явления в горных породах и выработках : Матер. XXI Межд. науч. школы, Алушта, 19-25 сент. 2011 г. Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2011. С. 200-202. (очна участь)

42. Слащев И.Н., Горбачев Г.И. Разработка и апробация технологии компьютерного анализа состояния трещиноватого породного массива / Математичні проблеми технічної механіки – 2012 : Матер. Межд. наук. конф., Дніпропетровськ, 16-19 квітня 2012 р. Дніпродзержинськ - Дніпропетровськ: Придніпр. наук. центр НАН України, 2012. Том 2. С. 69. (очна участь)

43. Слащев И.Н., Слащева Е.А. Исследование работы систем крепления в обводненном массиве горных пород / Деформ. и разруш. матер. с дефектами и динам. явления в горных породах и выработках : Матер. XXII Межд. науч. школы, Алушта, 17-23 сент. 2012 г. Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2012. С. 305-307. (очна участь)

44. Булат А.Ф., Слащев И.Н. Особенности и практика использования методов математического моделирования для оценки геомеханических и газодинамических процессов / Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2012): Матер. XI Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием, секция «Математическое моделирование в науке и технике», Анжеро-Судженск, 23-24 нояб. 2012 г. Кемерово: Практика, 2012. Ч. 1. С. 22-26. (заочна участь)

Публікації в науково-технічних журналах

45. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Морозов А.А. Принципы построения экспертных систем управления безопасностью угольных шахт / Промышленная безопасность. 2012. № 9. С. 42-45.

46. Слащов І.М. Підвищення геомеханічної безпеки шахт / Технополіс плюс. 2019. № 12. С. 26-28.

Нормативні документи та Стандарти України

47. СОУ 10.1.05411357.010:2014. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2014-11-10] / Булат А., Круковський О., Буліч Ю., Бурков А., Вівчаренко О., Деміденко О., Деньгін А., Курносов С., Лещінський С., Пилюгин В., Попович І., Рябцев О., Слащов І., Смірнов А., Хворостян В., Чередніченко Ю., Яценко І. Вид. офіц. К.: Міненерговугілля України, 2014. 84 с.

48. СОУ 10.1.00174088.018:2018. Система управління виробництвом і охороною праці у вугільній промисловості України: перша редакція / Булат А., Бунько Т., Круковський О., Мінесв С., Слащов І., Шевченко В. Вид. офіц. К.: Міненерговугілля України, 2018. 343 с.

Патенти України

49. Буровий постав для нарізки шпура: Пат. № 39204 UA / Цікра О.А., Возіянов В.С., Ковбасенко В.Б., Курносов А.Т., Курносов С.А., Слащов І.М.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. у 2008 11698; заявл. 30.09.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 3. 2 с.

50. Спосіб закріплення анкера в слабких породах: Пат. № 41968 UA / Цікра О.А., Філімонов П.Є., Возіянов В.С., Курносов А.Т., Курносов С.А., Слащов І.М., Слащова О.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. у 2008 09042; заявл. 10.07.2008; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12. 3 с.

51. Буровий постав для нарізки шпура: Пат. № 49822 UA / Цікра О.А., Філімонов П.Є., Возіянов В.С., Курносов А.Т., Курносов С.А., Слащов І.М., Слащова О.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. у 2009 12377; заявл. 30.09.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9. 2 с.

52. Шахтний зтяг з композитного матеріалу: Пат. № 58759 UA / Булат А.Ф., Курносов С.А., Возіянов В.С., Гірченко А.Г., Слащов І.М., Слащова О.А., Коваль Н.В.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. у 2010 11397; заявл. 24.09.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. 2 с.

53. Рамне податливе кріплення з спец профілю: Пат. № 58760 UA / Слащов І.М., Возіянов В.С., Курносов С.А., Слащова О.А.; заявник і патентовлас-

ник ІГТМ НАНУ. u 2010 11399 ; заявл. 24.09.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. 3 с.

54. Спосіб закріплення анкера у породах гірничої виробки: Пат. № 58761 UA / Цікра О.А., Філімонов П.Є., Возіянов В.С., Слащов І.М., Курносів С.А., Іконнікова Н.А., Коваль Н.В.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. u 2010 11401; заявл. 24.09.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. 3 с.

55. Спосіб видобування метану на полях закритих вугільних шахт із крутопохилими або крутими пластами: Пат. № 78969 UA / Булат А.Ф. , Возіянов В.С. , Слащов І.М., Слащова О.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. Опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. 4 с.

56. Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт: Пат. № 78970 UA / Булат А.Ф. , Возіянов В.С. , Слащов І.М., Слащова О.А., Курносів С.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. Опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. 4 с.

57. Спосіб прогнозу газодинамічних проявів гірського тиску викидонебезпечного масиву порід: пат. 122441 UA / Булат А.Ф., Слащов І.М., Возіянов В.С., Слащов А.І. Опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1. 3 с.

58. Спосіб спорудження підземних сховищ для низько- і середньоактивних радіаційно небезпечних відходів: пат. 138735 UA / Булат А.Ф., Круковський О.П., Курносів С.А., Возіянов В.С., Іванов В.А., Слащов І.М., Ключев Е.С., Шевченко В.Г. Опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23.

Внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві. Ідеї і результати основних досліджень щодо рішення науково-технічної проблеми опубліковані автором особисто [1, 3-5, 11, 13, 14, 18, 22, 23, 46]. У роботах [2, 26] – проаналізовані фактори та вхідні дані МСЕ, обґрунтовані методики оцінки процесів зрушення і проявів гірничого тиску комп'ютерними технологіями; [8, 9, 12, 15, 16, 32, 47] – дослідження НДС структурно-неоднорідних порід та нових способів підвищення стійкості анкерних і рамно-анкерних систем підтримання гірничих виробок, випробування в шахтних умовах різних охоронних конструкцій; [49-54, 56] – обґрунтування параметрів нових способів підвищення стійкості гірничих виробок; [19, 21, 39, 40, 43] – шахтні дослідження закономірностей деформування покрівлі та здимання підосви гірничих виробок та оцінка НДС гірських порід при його поетапному залученні в охоронну конструкцію; [7, 17, 20, 24, 31, 38, 42, 45, 58] – обґрунтування геомеханічної моделі, розробка ключових елементів комп'ютерних систем математичного моделювання геомеханічних і газодинамічних процесів та технологій систем управління персоналом і віддаленого контролю безпеки; [27, 41] – визначення параметрів процесу формування зон руйнування в породному масиві; [6, 29, 30, 33, 35, 36, 37, 44, 46, 48] – ідентифікація факторів ризиків і розробка методів прогнозу потенційно небезпечних проявів гірського тиску у виробках шахт, закономірності для методів радіометричного контролю, побудова нечітких моделей для цифрових систем оцінки стійкості гірничих виробок; [10, 34, 55] – управління напружено-деформованим станом газонасичених порід, розрахунки елементів технологій дегазації та способів підвищення продуктивності дегазаційних свердловин; [25, 28, 57] – встановлення домінуючих зв'язків між параметрами геомеханічного

процесу з параметрами емісії газу метану і продуктів розпаду радону в гірничі виробки, визначення продуктів розпаду радону як інформативних параметрів способу прогнозу газодинамічних проявів гірського тиску.

АНОТАЦІЯ

Слащов І.М. Розвиток наукових основ геомеханічного та радіометричного контролю параметрів безпеки шахт. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка» та 05.26.01 – «Охорона праці». – Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми встановлення закономірностей змін напружено-деформованого стану газонасичених структурно-неоднорідних порід під впливом гірничих робіт, емісії газів метану та дочірніх продуктів розпаду радону в гірничі виробки, а також обґрунтування комплексних показників ризиків небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів в породному масиві, розробки методів і програмно-технічних засобів геомеханічного та радіометричного контролю параметрів безпеки виробничого середовища шахт.

Подальший розвиток отримала математична модель для оцінки зон руйнування в газонасичених та обводнених гірських породах, яка відрізняється спільним урахуванням природних структурних дефектів, магістральних тріщин, шаруватості порід, пластових газових тисків, наявності води в тріщинах і порах, а також визначенням інваріантів компонент головних деформацій, які характеризують зміни форм і об'ємів порово-тріщинного простору, де формуються області газового живлення в процесі ведення гірничих робіт. Вперше на базі параметрів орієнтації систем тріщин і кульової частини тензора деформацій встановлені закономірності змін форми та об'ємів порово-тріщинного простору на різних етапах відпрацювання суміжних лав.

Отримані співвідношення, що встановлюють взаємозв'язки параметрів геомеханічного процесу з параметрами газодинамічного процесу, які можуть бути інтегровані в інформаційні системи превентивного контролю стану виробничого середовища шахт. Встановлена затухаюча квазіперіодична залежність емісії газу метану в свердловини, що дозволяє визначати схеми розташування свердловин для підвищення ефективності дегазації.

Вперше встановлено стійкий взаємозв'язок між динамікою змін концентрації метану і наведеною концентрацією продуктів розпаду радону в діапазоні відхилень від середнього значення $\pm 20\%$. Подальший розвиток отримав метод контролю безпечного стану гірських порід, який відрізняється використанням встановлених взаємозв'язків між змінами параметрів систем тріщин та змінами активності α -випромінювань окремих ізотопів радону, концентрацій метану і їх співвідношень.

Подальший розвиток отримав метод оцінки рівнів безпеки ведення гірничих робіт, що відрізняється комплексними показниками, які визначають готовність породного масиву до небезпечних сценаріїв розвитку геомеханічних і газодинамічних процесів. Показники визначають за статистично значущою кількістю параметрів попередніх подій або за трендами і аналітичними прогнозами подальших подій з залученням моделей нечіткої логіки та експертних правил.

Розроблено і впроваджено ряд методик, рекомендацій, програмного забезпечення та нормативних документів: щодо способів управління силовими характеристиками системи «кріплення-масив»; технологій дегазації; прогнозу небезпечних проявів гірського тиску методом радіометричного контролю; програмного забезпечення з моделювання геомеханічних і газодинамічних процесів, управління персоналом і віддаленого контролю безпеки; галузевого Стандарту України «Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги»; остаточної редакції галузевого Стандарту України «Система управління виробництвом і охороною праці у вугільній промисловості України», який регламентує вимоги до безпечного ведення гірничих робіт та управління ризиками у відповідності з міжнародними стандартами OHSAS 18001 та ISO 9001. Розробки мають соціальний, екологічний та економічний ефекти. Економічний ефект від впровадження 4,8 млн грн.

Ключові слова: напружено-деформований стан масиву порід, прогноз геомеханічного стану, стійкість гірничих виробок, емісія газу, охорона праці, радіометричний контроль, віддалений контроль безпеки.

АННОТАЦИЯ

Слащёв И.Н. Развитие научных основ геомеханического и радиометрического контроля параметров безопасности шахт. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика» и 05.26.01 – «Охрана труда». – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы установления закономерностей изменений напряженно-деформированного состояния газонасыщенных структурно-неоднородных пород под влиянием горных работ, эмиссии газов метана и дочерних продуктов распада радона в горные выработки, а также обоснования комплексных показателей рисков опасных сценариев развития геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве, разработки методов и программно-технических средств геомеханического и радиометрического контроля параметров безопасности производственной среды шахт.

Дальнейшее развитие получила математическая модель для оценки зон разрушения в газонасыщенных и обводненных горных породах, которая отличается совместным учетом природных структурных дефектов, магистральных

трещин, слоистости пород, пластовых газовых давлений, наличия воды в трещинах и порах, а также определением инвариантов компонент главных деформаций, характеризующих изменения форм и объемов порово-трещинного пространства, где формируются области газового питания в процессе ведения горных работ. Впервые на базе параметров ориентации систем и шаровой части тензора деформаций установлены закономерности изменений формы и объемов порово-трещинного пространства на различных этапах отработки смежных лав.

Получены соотношения, устанавливающие взаимосвязи параметров геомеханического процесса с параметрами газодинамического процесса, которые могут быть интегрированы в информационные системы превентивного контроля состояния производственной среды шахт. Установлена затухающая квазипериодическая зависимость эмиссии метана в скважины, позволяющая определять схемы расположения скважин для повышения эффективности дегазации.

Впервые установлена устойчивая взаимосвязь между динамикой изменений концентрации метана и приведенной концентрацией продуктов распада радона в диапазоне отклонений от среднего значения $\pm 20\%$. Дальнейшее развитие получил метод контроля безопасного состояния горных пород, который отличается использованием установленных взаимосвязей между изменениями параметров систем трещин и изменениями активности α -излучений отдельных изотопов радона, концентраций метана и их соотношений.

Дальнейшее развитие получил метод оценки уровней безопасности ведения горных работ, отличающийся комплексными показателями, которые определяют готовность породного массива к опасным сценариям развития геомеханических и газодинамических процессов. Показатели определяют по статистически значимому количеству параметров предыдущих событий или по трендам и аналитическим прогнозам дальнейших событий с привлечением моделей нечеткой логики и экспертных правил.

Разработаны и внедрены ряд методик, рекомендаций, программного обеспечения и нормативных документов: по способам управления силовыми характеристиками системы «крепь-массив»; технологиям дегазации; прогнозу опасных проявлений горного давления методом радиометрического контроля; программного обеспечения по моделированию геомеханических и газодинамических процессов, управлению персоналом и удаленному контролю безопасности; отраслевого Стандарта Украины «Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования»; окончательной редакции отраслевого Стандарта «Система управления производством и охраной труда в угольной промышленности Украины», регламентирующего требования к безопасному ведению горных работ и управлению рисками в соответствии с международными стандартами OHSAS 18001 и ISO 9001. Разработки имеют социальный, экологический и экономический эффекты. Экономический эффект от внедрения 4,8 млн грн.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние массива пород, прогноз геомеханического состояния, устойчивость горных выработок, эмиссия газа, радиометрический контроль, удаленный контроль безопасности.

ANNOTATION

Slashchov I.M. Development of scientific basics for geomechanical and radiometric control of mine safety parameters. – Manuscript.

Doctor of Technical Sciences degree thesis. Specialty 05.15.09 – "Geotechnical and Mining Mechanics" and 05.26.01 – "Labor protection". – Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical problem of establishing the patterns of changes in the stress-strain state of gas-saturated structurally-heterogeneous rocks under the influence of mining, the emission of methane gases and radon daughter decay products into mine workings, as well as substantiation of risks complex indicators of for the of geomechanical and gas-dynamic processes dangerous development scenarios in the rock massif, development of methods and software for geomechanical and radiometric control of the mines production environment safety parameters.

The mathematical model for assessing the destruction zones in gas-saturated and water-cut rocks has been further developed, it differs in the use of the joint consideration of natural structural defects, main cracks, rock layering, reservoir gas pressures, the presence of water in cracks and pores, as well as the determination of the main deformations components invariants, which characterize the changes in the shapes and volumes of the pore-fracture space, where areas of gas supply are formed in the process of mining. For the first time, regularities of changes in the pore and fracture area shape and volume at different stages of the adjacent longwall mining have been determined basing on parameters of fracture system orientation and spherical part of the strain tensor.

The relationships were formulated, which established interdependence between the parameters of geomechanical process and parameters of gas-dynamic process, which can be integrated into information systems for preventive control of the state of working environment in the mines. A decaying quasi-periodic dependence of methane emissions into wells has been established, which allows you to determine the layout of wells to improve the efficiency of degassing.

It is further for the first time a stable interdependency between dynamics of changes in methane concentration and reduced concentration of radon decay products when deviation of concentration change is within $\pm 20\%$ are disclosed. These interdependencies can be a basis for designing new methods for prediction manifestations of geomechanical and gas-dynamic processes. The method of controlling the safe state of rocks has been further developed; it differs in the use of the determined ratios between changes in fracture system parameters and changes in α -radiation activity of some radon isotopes, methane concentrations and their correlation.

The method for assessing of the mining operation safety levels was further developed, it differs in the use of the complex indicators that determine the rock massif preparedness for hazardous scenarios of the geomechanical and gas-dynamic processes. Indicators are determined by a statistically significant number of parameters

of previous events or by trends and analytical forecasts of further events using fuzzy logic models and expert rules.

A number of techniques, recommendations, software and regulatory documents have been developed and implemented: on the methods of controlling the power characteristics of the "support-massif" system; of degassing technologies; forecasting dangerous manifestations of rock pressure using of the radiometric control method; software for modeling geomechanical and gas-dynamic processes, personnel management and remote safety control; Industry Standard of Ukraine "System for ensuring reliable and safe functioning of mining workings with anchorage. General technical requirements"; the final version of the Industry Standard of Ukraine "Production and labor safety management system in coal industry of Ukraine. Typical regulations", regulating the requirements for safe mining and risk management in accordance with international standards OHSAS 18001 and ISO 9001. Developments have social, environmental and economic effects. The economic effect from the implementation is 4.8 million UAH.

Keywords: rock massif stress-strained state, forecast of geomechanical state permeability, stability of mine workings, gas emission, labor protection, radiation monitoring, remote safety control.

Слащов Ігор Миколайович

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ГЕОМЕХАНІЧНОГО
ТА РАДІОМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ ШАХТ**

(Автореферат)

Гарнітура Times. Друк різнографічний.

Підписано до друку 31.03.2021 р.

Папір офсетний. 2,1 умов. друк. арк.

Тираж 110 прим. Зам. № 168

Друк ТОВ «Барвікс»

Свідоцтво про внесення до державного реєстру № 24 від 25.07.2000 р.
49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 21