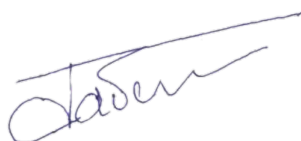


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

БАБЕЦЬ ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК [622.261-1123:622.281]:519.25

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У
ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗІ СТОХАСТИЧНО
РОЗПОДІЛЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

Спеціальність: 05.15.09 – Геотехнічна і гірничча механіка

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
СДВИЖКОВА Олена Олександрівна,
завідувачка кафедри вищої математики
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПЕТРЕНКО Володимир Дмитрович,
професор кафедри транспортної інфраструктури
Дніпровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор
НАЗИМКО Віктор Вікторович,
головний науковий співробітник
Інституту фізики гірничих процесів
НАН України (м. Дніпро);

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
член-кореспондент НАН України
КРУКОВСЬКИЙ Олександр Петрович,
заступник директора з наукової роботи
Інституту геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова НАН України (м. Дніпро)

Захист дисертації відбудеться “ 23 ” вересня 2021 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19, корпус 1.

Автореферат розісланий “ 20 ” серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Програмою енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» задекларовано подальший розвиток власного видобутку вугілля, як одного з елементів забезпечення енергетичної незалежності Держави. При цьому, з огляду на світові тенденції розвитку енергетики, перед Україною постає завдання раціонального використання та подальшої розробки вугільних родовищ зі зниженням собівартості вугілля за рахунок концентрації гірничих робіт та впровадження більш ефективної техніки. Але нарощування темпів гірничих робіт обумовлює інтенсивне втручання у масив гірських порід, наслідком чого є небезпечні прояви гірського тиску, втрата стійкого стану підземних споруд, підвищення ризиків травматизму. Велика кількість досліджень щодо оцінки стійкості підземних споруд виконана такими вченими як Б. Усаченко, В. Виноградов, О. Шашенко, Ю. Халимендик, Е. Хок, Т. Майхерчик, А. Роєнко, О. Круковський, В. Петренко, В. Бондаренко, І. Садовенко, Л. Новикова, В. Кравець, Г. Гайко, О. Солодянкін та ін., але і сьогодні актуальною залишається проблема забезпечення стійкого стану виробок в складних гірничо-геологічних умовах та при впровадженні новітніх технологічних рішень, коли недоліки проектування, внаслідок неврахування ускладнюючих факторів, призводять до надмірно оптимістичних оцінок несучої здатності порід та, як наслідок, до втрати функціональної спроможності споруд або до аварійних ситуацій. Незважаючи на те, що на сьогодні в практику проектування увійшли досить розвинуті методи комп'ютерного моделювання та візуалізації, обчислювальні алгоритми часто базуються на занадто спрощеній уяві про розвиток геомеханічних процесів в породних масивах, які мають природні порушення структури та текстури у вигляді тріщин, площин ковзання, зон вивітрення, зволоження та ін., а також зазнали техногенної порушеності внаслідок оголення порід виробками.

Фізико-механічні властивості гірських порід є основною початковою інформацією для моделювання стану порід, але безумовна стохастична природа цих даних досі не досконало відображується в геомеханічних розрахунках, незважаючи на розвиток ймовірно-статистичних підходів в працях О. Шашенка, О. Сдвижкової, В. Назимка, С. Гапєєва, С. Скипочки, С. Рубця, П. Малковського, А. Форда, Г. Байчер та ін. Наявність розривів суцільності породного середовища, міра розкритості контактів та стан поверхні розривів досі залишається поза увагою дослідників при визначенні напружено-деформованого стану (НДС) масиву навколо виробок. Тим більш, відсутні узагальнюючі закономірності впливу структурної порушеності масиву на стійкість породних оголень, які б слугували основою для раціонального вибору параметрів кріплення та охорони виробок, а також надавали можливість пошуку оптимальних проектних рішень при визначених обмеженнях відповідно до специфічних гірничо-технічних ситуацій.

Таким чином, удосконалення прогнозу поведінки структурно та техногенно порушеного масиву на основі математичного моделювання, розвитку ймовірно-статистичних підходів та встановлення закономірностей зміни його механічного стану на різних стадіях гірничо-видобувних робіт з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей середовища є актуальною науковою проблемою, вирішенню якої присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає програмі «Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», затвердженої розпорядженням Кабінету міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р. До дисертаційної роботи увійшли результати досліджень, які виконані згідно з тематичними планами науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка» за темами: 072127-19 «Обґрунтування за допомогою чисельного моделювання параметрів литої полоси виїмкових ділянок з урахуванням фізико-механічних властивостей порід підосви пластів, що відпрацьовуються ПАТ «ШУ Покровське» 2019 р.; 072120-19 «Аналіз зміни геомеханічної ситуації та стійкості ППОШ гор. 593 м та ППКШ гор. 593 в умовах їх надробки очисними роботами в умовах ПАТ «ШУ Покровське», 2019 р.; 050310 «Прогнозування геологічних порушень та якості промислових запасів ШУ «Першотравенське» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», 2018-2019 рр., «Розробка апаратно-програмного комплексу акустичного сканування неоднорідного породного масиву для підвищення безпеки підземних робіт» (№ держ. реєстрації 0116U007674, 2016-2018 р); 050402 «Спеціальний проект проведення відкотного квершлягу пл. С101 шахти «Самарська» в небезпечній зоні Богданівського скиду, авторський нагляд і моніторинг ускладнюючих факторів при проведенні відкотного квершлягу», 2015-2016 рр., у яких автор брав участь як відповідальний виконавець розділів.

Мета роботи полягає у встановленні, на основі математичного моделювання, закономірностей геомеханічних процесів в структурно та техногенно порушеному масиві й вдосконаленні на цій основі прогнозу тривалого стійкого стану підземних споруд, а також підвищенні надійності їх проектування.

Для досягнення поставленої мети в дисертації сформульовано і виконано наступні **задачі досліджень**:

1. На основі проведення натурних спостережень, лабораторних випробувань та імітаційного моделювання розвинути підходи до кількісної оцінки якісного стану неоднорідного породного середовища, що оточує підземні виробки різного призначення, за рахунок вдосконалення стохастичних моделей здатності масиву чинити опір зовнішньому навантаженню, зокрема, розробити узагальнені ймовірно-статистичні алгоритми врахування таких ознак структури масиву як інтенсивність тріщинуватості, стан поверхні розривів, а також обводнення порід.

2. Розробити інженерний підхід до визначення основних геомеханічних характеристик масиву у вигляді класифікації масиву за категоріями стійкості, що дозволяє адаптувати світовий досвід рейтингування «якості» масивів до проектування підземних споруд.

3. Встановити закономірності впливу особливостей структури неоднорідного породного масиву на компоненти його тривимірного напружено-деформованого стану, що відповідальні за формування навантаження на кріплення протяжної підземної виробки залежно від положення прохідницького вибою в складних гірничо-геологічних умовах, зокрема в зонах великих геологічних порушень.

4. Адаптувати алгоритми тривимірного чисельного моделювання до багатфакторного аналізу стійкого стану техногенно порушеного середовища в зоні очисних робіт

з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей порід та особливостей структури масиву.

5. Встановити закономірності зміни тривимірного напружено-деформованого стану масиву навколо геомеханічної системи «виїмковий штрек - лава» залежно від параметрів елементів охорони виробок та міцнісних властивостей порід з урахуванням ускладнюючих факторів: інтенсивної тріщинуватості, розкритості тріщин, прослизання поверхонь розривів, обводнення, а також визначити фактори, що найбільшою мірою впливають на рівноважний стан системи «оголення-масив-елемент охорони».

6. На основі методу групового урахування аргументів (МГУА) побудувати математичну модель прогнозу втрати перерізу виїмкового штреку залежно від домінуючих факторів та запропонувати інженерну методику визначення параметрів елементів охорони виробок з урахуванням стохастичного розкиду фізико-механічних властивостей порід, а також ускладнюючих факторів структури масиву.

7. Встановити закономірності розвитку деформацій породного масиву на різних етапах очисних робіт з повторним використанням підготовчих виробок на основі сучасних алгоритмів аналізу складних систем, обґрунтувати інтегральний показник забезпечення стійкості виробок, що перебувають під впливом вироблених просторів двох лав, а також згенерувати прогностичну модель стійкого стану системи «лава – штрек – лава» з залученням індуктивного підходу.

Об'єкт досліджень – геомеханічні процеси, що відбуваються в структурно й техногенно порушеному масиві при проведенні виробок та відпрацюванні вугільних пластів.

Предмет досліджень – математичні моделі та закономірності зміни напружено-деформованого стану породного масиву на різних стадіях гірничо-видобувних робіт у складних гірничо-геологічних умовах.

Ідея роботи полягає в представленні породного масиву як середовища з фізико-механічними властивостями, що розподілені стохастично за рахунок наявності в ньому структурних порушень, та адаптації алгоритмів чисельного моделювання до створення прогностичних моделей стійкості підготовчих виробок.

Методи досліджень: критичний аналіз та узагальнення світового досвіду моделювання геомеханічних процесів; емпірико-статистичний метод узагальнення результатів натурних та лабораторних досліджень; методи теорії ймовірності; математичні (чисельні) методи механіки суцільних та дискретних середовищ (методи скінчених та дискретних елементів); методи кореляційного та регресійного аналізу; методи структурно-параметричної ідентифікації складних об'єктів та індуктивного моделювання (метод групового урахування аргументів); методи розв'язання задач нелінійної оптимізації (метод узагальненого приведенного градієнта).

Основні наукові положення, що виносяться на захист:

1. Стан поверхні тріщин та контакту між породними блоками, а також вологість порід комплексно характеризують якість породного середовища, що формалізується параболічною функцією введеного в розгляд індексу стану тріщин таким чином, що зменшення зазначеного індексу від 100 до 1 знижує міцнісні та деформаційні характеристики порід на 10 - 50% залежно від інтенсивності тріщинуватості, що дозволило

розробити класифікацію породних масивів за категоріями стійкості та підвищити достовірність геомеханічних розрахунків.

2. Переміщення контуру протяжної виробки, зони руйнування порід навколо неї та відстань від прохідницького вибою, на якій реалізується стабілізація деформацій приконтурних порід, збільшуються за показниковим законом при збільшенні параметру розробки ($\gamma H/\sigma$) та зменшенні відстані між тріщинами l_t , а також індексу стану тріщин (J), що характеризує поверхні розривів та зволоженість масиву. Це дозволяє прогнозувати геомеханічні характеристики при проведенні протяжних горизонтальних виробок в складноструктурному середовищі та при проектуванні кріплення.

3. Стійкість підготовчих виробок в зоні впливу виробленого простору лави кількісно оцінюється вертикальною конвергенцією порід, що є багатовимірною нелінійною функцією стохастичної міцності масиву, потужності вугільного пласта, а також параметрів охорони виробки, причому значущість кожного аргументу в структурі прогностичної моделі така: ширина литої смуги (w) – 48 %, потужність вугільного пласта (m) – 25 %, міцність порід підосви (σ) – 23 % та міцність литої смуги з Бі-кріплення (R_{II}) – 4 %.

4. Залишкова площа перерізу дільничної виробки при повторному використанні після сполучення з другою лавою змінюється за багатопараметричним степеневим законом так, що вплив кожного параметру на результуючий показник становить: «відносна кількість анкерів на площу перерізу виробки» (N_a) – 32%, «ширина охоронного елемента, віднесена до потужності пласта» (w/m) – 28%, «крок встановлення металевих аркового кріплення» (q) – 18%, «параметр умов розробки» ($\gamma H/\sigma$) – 13% та «жорсткість охоронного елемента» (k_n) – 9%, причому в границях введених обмежень глобальний максимум досягається при $N_a = 0,47$; $w/m = 0,8$; $q = 0,5$ м; $k_n = 10000$ МПа/м для всіх значень $\gamma H/\sigma$ з інтервалу варіювання від 0,3 до 0,7.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше на основі проведення натурних спостережень, лабораторних випробувань та імітаційного моделювання запропоновано кількісний параметр (індекс J), що характеризує стан поверхні тріщин та міру їх зволоження. Встановлено функцію зниження міцнісних та деформаційних властивостей породного масиву залежно від запропонованого індексу у вигляді полінома другого ступеня.

2. З урахуванням отриманої функції зниження міцності та модуля деформації структурних елементів масиву вдосконалена ймовірно-статистична модель “якості” породного масиву, що вперше дозволило враховувати стан поверхні тріщин та обводнення при визначенні реальних фізико-механічних властивостей породного середовища.

3. Вперше встановлені багаточинні закономірності впливу параметрів тріщинуватості на переміщення контуру протяжної підземної виробки та зони руйнування порід, що відповідають за навантаження на кріплення виробки. Показано, що при всіх значеннях параметру розробки $\gamma H/\sigma$ переміщення контуру виробки та зони руйнування збільшуються за показниковим законом при зменшенні відстані між тріщинами (l_t) та індексу (J), що комплексно оцінює зволоженість та стан поверхонь втрати суцільності. При цьому встановлено, що при зменшенні середньої відстані між тріщинами вплив стану поверхні тріщин та їх обводнення експоненційно зростає.

4. На основі тривимірного моделювання покрокового посування прохідницького вибою вперше встановлено зв'язок між показниками структурної порушеності масиву гірських порід (відстань між тріщинами, стан поверхні тріщин) та відстанню до вибою, на якій відбувається стабілізація переміщень, що дозволяє обґрунтовано керувати функціональними режимами роботи кріплення виробки.

5. Шляхом аналізу відповідності переміщень контуру виробки показникам структурної порушеності масиву (відстані між тріщинами (l_t), індексу стану тріщин (J)), а також відстані до вибою (d), на якій відбувається стабілізація деформацій порід, розроблено нову класифікацію масиву за категоріями стійкості, що дозволяє адаптувати світовий досвід віднесення порід до тієї чи іншої рейтингової категорії для виконання геомеханічних розрахунків, які передують проектуванню підземних споруд.

6. Вперше на основі комбінаторних та ітераційних алгоритмів структурної ідентифікації побудована прогностична модель вертикальної конвергенції підготовчої виробки в зоні впливу очисних робіт як багатовимірної нелінійної функції міцності масиву, потужності вугільного пласта, а також параметрів охорони виробки. Доведено, що найбільший вплив на розвиток деформацій при сполученні лави зі штреком має відношення ширини елемента охорони до потужності вугільного пласта, що дозволяє проектувати засоби охорони виробок в широкому діапазоні зміни геологічних параметрів.

7. Вперше для умов повторного використання виробок на основі методу узагальненого приведення градієнта (Франка-Вульфа) розв'язано задачу нелінійної оптимізації багатофакторної залежності залишкової площі перерізу виробки після сполучення її з другою лавою від комплексу технічних та геологічних факторів. Встановлено, що найбільш впливовими факторами є кількість анкерів, віднесена до площі перерізу виробки, та ширина охоронного елемента, віднесена до потужності вугільного пласта; отримано значення всіх аргументів, при яких збережена площа виробки сягає максимуму.

Наукове значення роботи полягає в розвитку ймовірно-статистичних підходів щодо урахування структурної порушеності породного масиву (інтенсивності тріщин, стану поверхні тріщин) та обводнення порід, удосконаленні на цій основі алгоритмів математичного моделювання поведінки техногенно порушеного масиву, встановленні закономірностей зміни механічного стану породного середовища на різних стадіях гірничо-видобувних робіт з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей порід.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

- розроблено інженерну методику визначення коефіцієнту структурного послаблення масиву гірських порід за результатами геологічних досліджень якості породного масиву (інтенсивності тріщин, стану поверхні контакту, міри її зволоженості) в зоні техногенного оголення порід, що дозволяє врахувати структурні особливості масиву при використанні нормативних розрахункових алгоритмів та розробці паспортів кріплення;
- розроблено класифікацію масиву за категоріями стійкості, що дозволяє виконувати інженерну оцінку геомеханічних характеристик на початковій стадії проектування підземних споруд;

- розроблено методику моделювання дворівневої системи кріплення підготовчих виробок та параметрів охорони накатними смугами з дерев'яних брусів з пошаровим закріпленням піщано-цементним розчином;
- розроблено рекомендації з вибору раціональних параметрів литої смуги в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське»;

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується достатнім обсягом натурних та лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей порід та структурної порушеності масивів, використанням апробованих методів математичного моделювання та багатофакторного аналізу, співпадінням результатів скінчено-елементного аналізу з даними натурних спостережень в частині конвергенції порід та зменшення розмірів виробки в межах 10-15%, позитивним досвідом впровадження результатів математичного моделювання на шахтах ПрАТ «ШУ «Покровське» та ПрАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля».

Реалізація висновків, рекомендацій. Основні положення і результати досліджень дисертації представлені у вигляді документів: «Методика оцінки стійкості сполучень очисних вибоїв з дільничними виробками» (для умов ш. Ювілейна ШУ «Першотравенське»); «Рекомендації щодо вибору раціональних параметрів литої смуги в умовах ПАТ «ШУ «Покровське»»; «Рекомендації з вибору технології проведення парних виробок при струговій технології відпрацювання вугільних пластів для умов шахт ПАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля»»; «Рекомендації з забезпечення стійкості вентиляційного штреку 8 північної лави ш. «Добропільська» при проведенні його в присічку до 7 конвеєрного штреку назустріч очисному вибою 7 північної лави горизонту 450 м»; «Методика чисельного моделювання параметрів та технології спорудження комбінованого кріплення типу АСН-А (арка + сітка + набризкбетон + анкер)» та «Програма та методика попередніх випробувань зразка апаратно-програмного комплексу акустичного сканування неоднорідного породного масиву». Результати роботи використовуються та рекомендовані до впровадження на підприємствах ПрАТ «ШУ «Покровське» та ПрАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля» (акт впровадження, Додаток Б). Результати дисертаційного дослідження також використовуються у навчальному процесі кафедри вищої математики та кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки НТУ «Дніпровська політехніка» під час підготовки студентів освітніх рівнів бакалавр та магістр при викладанні дисципліни «Геомеханіка», «Математичне моделювання систем» та «Теорія ймовірностей і математична статистика».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою роботою, в якій викладено авторський підхід до розробки ймовірно-статистичних моделей щодо урахування структурних особливостей породного масиву, розробки алгоритмів тривимірного моделювання стану породного масиву, елементів кріплення та охорони виробок, впровадження алгоритмів структурної ідентифікації моделей на основі методу групового урахування аргументів та нелінійної оптимізації багатовимірних функцій. Здобувачем самостійно сформульовані мета та завдання досліджень, проведені лабораторні тестування зразків гірських порід та натурні обстеження стану виробок, виконано аналіз та узагальнення експериментальних даних, встановлені закономірності геомеханічних процесів в техногенно порушеному масиві. Внесок автора в роботи, опубліковані у співавторстві, конкретизовано в списку публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались, обговорені і схвалені на міжнародних науково-практичних конференціях: «Форум гірників» (Державний ВНЗ «НГУ», Дніпропетровськ, 2007, 2009, 2012, 2013, 2014, 2017); Construction and Operation of Underground Establishments - «MicroCAD» (Miskolc, Hungary, 2008); 5th Colloquium «Rock Mechanics – theory and practice» (Vienna, Austria, 2010); 12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production «SWEMP 2010» (Prague, Czech republic, 2010); «Школа підземної розробки» (Державний ВНЗ «НГУ» Дніпропетровськ, 2012); Шляхи сучасної математики: освіта, наука індустрія (Державний ВНЗ «НГУ», Дніпропетровськ, 2013); «Енергоефективність та енергозбереження» (Державний ВНЗ «НГУ», Дніпропетровськ, 2017); International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management «SGEM» (Varna, Bulgaria, 2020).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 39 наукових робіт, з них: дві монографії, 18 статей у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (у т.ч. 6 статей – в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus), 5 статей – у зарубіжних виданнях (з них 2 статті – в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus), 13 статей – в матеріалах наукових конференцій (з них 1 стаття – в журналі, що індексується у наукометричній базі Scopus та 2 статті що індексуються у наукометричній базі Web of Science), 1 стаття в іншому виданні.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку літературних джерел із 273 найменувань на 30 сторінках, 4 додатки на 27 сторінках. Містить 267 машинописних сторінок, 142 рисунки і 27 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 339 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, темами і планами; сформульовано наукову проблему, мету, ідею та задачі досліджень, наукові положення, що захищаються в дисертації; представлено наукову новизну та практичне значення результатів; задекларовано особистий внесок автора, а також висвітлено апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У першому розділі проаналізовано перспективи видобутку вугілля в Україні та світі і визначено напрями розвитку вугледобувних підприємств в сучасних умовах. Вказано, що впровадження нової видобувної та прохідницької техніки означає нарощування темпів гірничих робіт, а це, в свою чергу, обумовлює інтенсивне та масштабне оголення гірських порід, наслідком чого є небезпечні прояви гірського тиску, втрата стійкого стану підземних споруд, підвищення ризиків травматизму. Тому проблема підтримання виробок в стійкому стані є актуальною і сьогодні, тим більш в складних (нетипових) гірничо-геологічних умовах або при впровадженні нових технічних рішень та нових технологій видобутку корисних копалин. Вирішення проблеми забезпечення стійкості виробок вимагає проведення комплексу пошуково-дослідницьких робіт, що включає лабораторні експерименти й натурні спостереження, узагальнення статистичної інформації та розробку на цій основі ймовірнісних моделей, а також математичне, зокрема, чисельне, моделювання геомеханічних процесів.

Огляд існуючих підходів до оцінки стійкості породних оголень показав, що міцнісні та деформаційні характеристики масиву є найважливішими параметрами, що обумовлюють здатність оголень зберігати початкову форму та розміри, тобто бути стійкими. Міцність породного масиву обумовлена не тільки типом порід, що його складають, а й різного роду розривами суцільності. Тріщинуватий гірський масив є неоднорідним і анізотропним середовищем із складною стохастичною структурою. Інтенсивність тріщин, орієнтація розривів, міра їх розкритості, вивітреності, зволоженості, шорсткості поверхні контактів значно впливають як на міцність, так і на деформаційні властивості породного масиву.

Намагання впорядкувати та узагальнити уявлення про можливий перебіг геомеханічних процесів в розмаїтті геологічних умов сприяло створенню різноманітних класифікацій гірських масивів з метою розробки простих інженерних підходів до проектування підземних споруд. При цьому деякі з них є занадто загальними, що не містять практичних рекомендацій щодо підтримання виробок, інші приурочені до конкретних технологій видобутку корисних копалин і містять числові значення геомеханічних параметрів (опір кріплення), які в разі впровадження нової видобувної техніки, зміні технологічних схем та розробці нестандартних технічних рішень можуть не відповідати дійсності. Аналіз світового досвіду показує, що ефективним інструментом прийняття інженерних рішень є введення рейтингових класифікацій масивів гірських порід, які базуються на оцінці «якості» породного масиву. Під цим терміном розуміють наявність вищезгаданих розривів (тріщин) з різною мірою розкритості, вивітреності, властивостей заповнювача, шорсткості поверхонь, а також утворення блоків з систем тріщин з різним кутом падіння, наявність вологості. Всі ці фактори є ускладнюючими, тобто такими, що знижують здатність масиву гірських порід чинити опір зовнішньому навантаженню. Саме наявність таких факторів обумовлює прийняття того чи іншого технічного рішення щодо проведення, кріплення та охорони виробок.

Урахування реальних властивостей породного масиву, його структурних особливостей, тобто адекватна оцінка «якості» середовища, є зниженням ризиків при проектуванні підземних споруд. При цьому досі немає чітких уявлень, як саме змінюються міцнісні та деформаційні властивості масиву залежно від перерахованих ускладнюючих факторів та немає узагальнюючих методик щодо кількісних оцінок можливих змін фізико-механічних характеристик порід в порівнянні з тими, що отримані шляхом тестування породних зразків. Розроблені на сьогодні статистичні підходи щодо врахування мікро- та макро-дефектів гірських порід дають зручний інструмент у вигляді коефіцієнтів послаблення, що знижують міцність всього породного масиву залежно від статистичного розкиду значень міцності зразків гірських порід, який спостерігається під час лабораторних випробувань. Але при визначенні коефіцієнту структурного послаблення досі не враховувався стан поверхні тріщин, тип заповнювача між поверхнями з'єднань і рівень обводнення породного масиву, які мають значний вплив на механічні властивості породного середовища.

Відповідно вказані фактори не враховуються при математичному моделюванні напружено-деформованого стану породного масиву навколо виробок, яке є одним з ефективних елементів проектування підземних споруд. Зокрема, адекватне відображення в математичній моделі погіршення «якості» середовища є вкрай необхідним для прогнозу поведінки оточуючого масиву при проведенні виробок в зонах

геологічних порушень, для яких характерна наявність інтенсивної тріщинуватості, блоковості, дезінтегрованості та обводнення порід. Прогноз переміщень, зон руйнування та пов'язаного з ними навантаження на кріплення залежно від наявності ускладнюючих структурних факторів є актуальним навіть для горизонтальних протяжних виробок поза зоною впливу очисних робіт. Узагальнюючі закономірності розвитку деформаційних процесів на різних етапах проведення виробки, зокрема на різних відстанях від прохідницького вибою, в масиві з різними характеристиками структурних неоднорідностей (з різною «якістю»), мали б стати практичною основою проектування кріплення виробок, але на сьогодні такі закономірності відсутні.

Тим більш відсутні багатофакторні прогностичні моделі щодо розвитку деформацій порід навколо сполучень підготовчих дільничних виробок та виробленого простору, при тому, що саме витрати на підтримання дільничних виробок складають значну частину собівартості вугілля, а роботи зі зведення кріплення та охоронних конструкцій в умовах обмеженого простору є найбільш небезпечними. В той же час, саме в цій частині менеджмент гірничих підприємств бачить шляхи оптимізації витрат за рахунок повторного використання підготовчих виробок. Але поведінка порід навколо сполучення штреків та виробленого простору двох лав досі не достатньо вивчена і слабо прогнозована. Недооцінка ризиків через неврахування ускладнюючих структурних факторів задля бажання отримання економічних переваг цілком можлива при проектуванні гірничих робіт та розробки паспортів кріплення, що несе в собі загрозу безпеці людей.

Отже, зроблений висновок про необхідність нового підходу до прогнозу поведінки структурно та техногенно порушеного масиву на основі розвитку ймовірнісно-статистичних та деформаційних моделей для встановлення закономірностей зміни його стану на різних стадіях гірничо-видобувних робіт з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей середовища. Сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі виконана оцінка впливу на фізико-механічні властивості породного масиву не тільки інтенсивності тріщинуватості (як це було зроблено в роботах О. Шашенка, О. Сдвижкової, С. Гапєєва відносно до характеристик міцності), але й міри розкритості контакту, типу заповнювача тріщин, а також вологості порід. Для цього автором розвинена ймовірнісно-статистична модель міцності породного масиву, згідно з якою масив розглядається як середовище зі стохастично розподіленими властивостями. Ймовірнісна природа властивостей масиву обумовлена як мікродефектами внутрішньої будови гірської породи, так і макродефектами породного масиву у вигляді геологічних розривів та систем тріщин, завдяки яким утворюються поверхні ослаблення та розділу, виникають умови для появи ефекту вивітрювання в блоках породи, прослизання та повертання цих блоків, що, в свою чергу, обумовлює нестійкий стан порожнин у породному масиві. Вплив насичення водою гірської породи на її міцнісні та деформаційні властивості пояснюється проникненням в найдрібніші порожнечі (пори і тріщини), розклиненням тріщин водою і набуханням окремих мінералів, що також носить стохастичний характер, який, перш за все, спостерігається при лабораторних випробуваннях зразків у вигляді статистичного розкиду механічних характеристик зразків порід. У згаданих вище роботах, запропоновано метод корегування моментів статистичного розподілу з урахуванням того, що реальний породний

масив містить системи тріщин, і тому властивості породних зразків (вибірки) не відображують насправді властивості генеральної сукупності. Показано, що при виготовленні зразків ті з них, які пересічені тріщиною, фізично не можуть потрапити до статистичної вибірки, бо руйнуються до початку випробувань. Автором дисертації цей підхід розвинено з позицій, що врахувати слід також структурні елементи, зразки з яких виготовити можливо, але завдяки мікродефектам, впливу вивітріння та іншим факторам їх міцність значно менша за середнє значення. Такі зразки зазвичай руйнуються на початковій стадії експерименту та не розглядаються у випадковій вибірці, бо вважаються аномальними значеннями. Але саме такі зразки характеризують реальний стан породного масиву і повинні бути враховані при визначенні характеристик статистичного розподілу.

Нехай $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n_s}$ значення границі міцності на стиснення, що отримані в результаті n_s випробувань за стандартною методикою. Така сукупність значень не є репрезентативною вибіркою з генеральної сукупності, оскільки, як вказувалось вище, в неї не потрапила частина аномальних результатів кількістю n_j та нульові значення для зразків, що містять макродефекти і реально не були виготовлені, кількістю n_t . Таким чином, статистична обробка повинна виконуватися для нової, «виправленої», вибірки, що складається з $n = n_s + n_t + n_j$ елементів. Середнє вибіркове (початковий момент першого порядку) такої «виправленої» вибірки становить:

$$m'_1 = \bar{\sigma}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sigma_i + \sum_{i=1}^{n_t} \sigma_{it} + \sum_{i=1}^{n_j} \sigma_{ij}}{n_s + n_t + n_j}, \quad (1)$$

Наявність системи тріщин, що реально існує в породному масиві, вводиться через відношення середньої відстані між тріщинами l_t до стандартного розміру породного зразка l_0 . Тоді, зв'язок між середніми «виправленої» репрезентативної вибірки m'_1 та початкової сукупності даних m_1 може бути представлений у вигляді:

$$m'_1 = m_1 \left(\frac{\frac{l_t}{l_0} + f(\alpha)}{\frac{l_t}{l_0}(1 + f(j)) + 1} \right) = m_1 K_{j1},$$

де $m_1 = \bar{\sigma} = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \sigma_i$ - середнє стандартної вибірки, $f(\alpha)$ - функція зниження міцності

зразка породи залежно від кута нахилу площини послаблення, що введена О. Сдвижковою; $f(j) = 1/\rho$ - емпірична функція, що додатково введена автором для опису зменшення міцності середовища саме через можливість розкриття та прослизання поверхні розривів суцільності. Аналогічно визначається початковий момент другого порядку та коефіцієнт K_{j2} впливу тріщинуватості на момент другого порядку

$K_{j2} = \frac{\frac{l_t}{l_0} + f^2(\alpha)}{\frac{l_t}{l_0}(1 + f(j)) + 1}$, а також найважливіша характеристика - відносна варіація

«виправленої» вибірки, що показує статистичний розкид значень міцності завдяки неоднорідності порід

$$\eta' = \frac{\sqrt{D'}}{m_1'} = \sqrt{\frac{K_{j2} m_2 - K_{j1}^2 m_1^2}{K_{j1}^2 m_1^2}} = \sqrt{\frac{K_{j2}}{K_{j1}^2} (\eta^2 + 1) - 1}, \quad (2)$$

де η - відносна варіація, що отримана за стандартною методикою без врахування впливу тріщинуватості породного масиву. Подальші дослідження були спрямовані на встановлення функції $f(j)$, яка за методикою автора є необхідною складовою відносною варіації «виправленої» вибірки (2).

В рамках договору про співпрацю між НТУ «Дніпровська політехніка» (Україна, Дніпро) і AGH - Науково-технічний університет (Польща, Краків) за фінансової підтримки Фонду цивільних досліджень і розвитку (США), було проведено серію випробувань породних зразків з використанням жорсткого преса виробництва компанії MTS (США) для визначення основних фізико-механічних характеристик. Для експериментів відбиралися зразки алевролітів, аргілітів і пісковиків нових ділянок шахтних полів шахт Західного Донбасу та Львівсько-Волинського басейну.

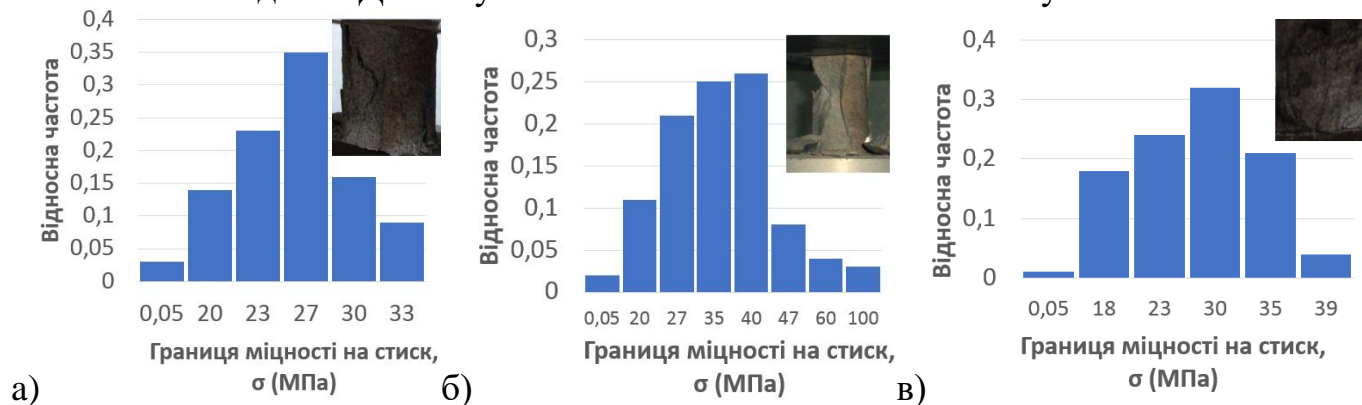


Рис. 1. Гістограми частот значень границі міцності на стиснення:
а - аргіліт; б - пісковик; в - алевроліт

Аналіз гістограм відносних частот значень міцності на одноосьовий стиск показав (рис. 1), що 1 – 3 % випробуваних зразків мають міцність меншу ніж 1 МПа. Ці зразки слід віднести до групи елементів зі зниженою міцністю у формулі (1). Крім того, саме врахування таких «аномальних» значень підвищує варіацію вибірки міцності практично вдвічі (з 20-25% до 40-50%), що повністю відповідає обраній ідеології введення функції $f(j)$ зниження міцності та підвищення ступеня неоднорідності вибірки.

Для дослідження причин руйнування деяких зразків на початковій стадії випробування в лабораторії петрографії Краківської АГН був проведений аналіз їх мікроструктури (рис. 2). Виконано мікроскопічне вивчення 25 зразків (шліфів) та виділені зразки з порушеною структурою. Саме ці зразки показали низькі значення міцності при випробування на гідравлічному пресі. Результати комплексу механічних та петрографічних досліджень використані для кількісної оцінки впливу наявності внутрішніх порушень і включень в зразку на його міцність.

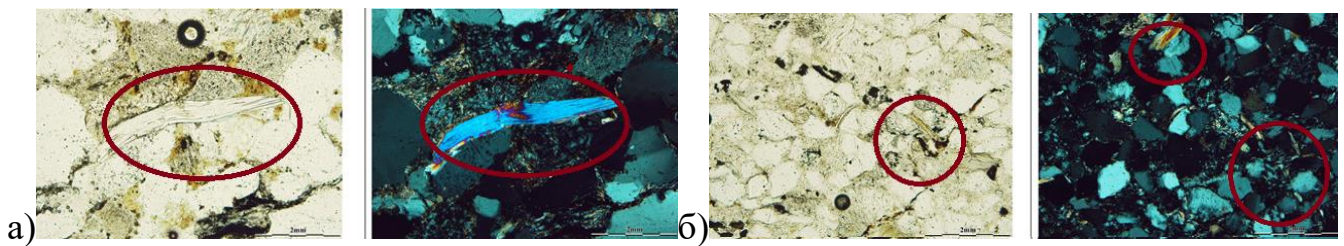


Рис. 2. Зріз зразків неоднорідної структури в масштабі 1:50:
а - зразок № 2; б - зразок № 3;

Для кількісного вивчення впливу саме стану контакту тріщин на міцність структурного елементу масиву виконано імітаційне моделювання руйнування породних зразків методом дискретних елементів (МДЕ) в програмному середовищі Yade. Стан поверхні втрати суцільності моделювався шляхом зміни параметрів контакту (коефіцієнту тертя) між дискретними елементами по площині розриву. Значення коефіцієнту тертя задавалися пропорційною індексу стану поверхні розриву (J), який введено автором для квантифікації якісних характеристик за аналогією з рейтинговою класифікацією З. Бінявського. За результатами багатоваріантного чисельного моделювання встановлено експоненційний характер впливу стану поверхні дефекту (тріщини) на міцність зразка, що досліджувався (рис. 3).

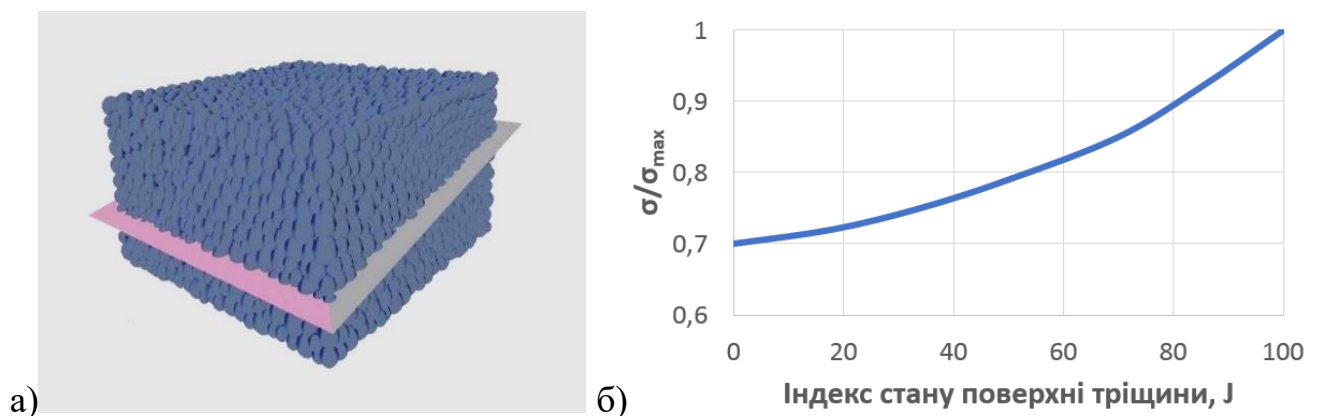


Рис. 3. Моделювання дефектного породного масиву:
а) модель дефектного породного зразка, порушеного тріщиною;
б) вплив якості поверхні дефекту на міцність

Для верифікації отриманої залежності проведені натурні спостереження за станом породних оголень та систем кріплення на ділянках протяжних виробок (шахта «Самарська» ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля») з розвиненою тріщинуватістю. Під час моніторингу фіксувалися наявність розривів, ступінь розкриття, шорсткість, наповнення, вологість поверхні тріщин, а також відповідна ступінь навантаження металевого рамного та анкерного кріплення на обстежуваних ділянках. Поверхні розривів також оцінювались шляхом введення індексу, що визначає розкритість тріщин та тип заповнювача. Ступінь навантаженості кріплення безпосередньо при інших рівних умовах характеризує міцність масиву. Виділено 4 категорії, за якими автор охарактеризував стан кріплення за спостереженнями (табл. 1). Візуалізація співставлення результатів спостережень *in situ* щодо категорії стану кріплення з індексом стану поверхні тріщин (J) наведена на рис. 4.

Категорії стану кріплення за візуальними спостереженнями

Опис стану кріплення	Категорія
Металеve рамне кріплення не обтиснуте, є проміжок між породами та кріпленням, стан анкерного кріплення задовільний	1
Рамне кріплення помірно обтиснуте, проміжку між породами та кріпленням немає, але рама не деформована, стан анкерного кріплення задовільний	2
Рамне кріплення сильно обтиснуте, наявні деформовані елементи верхняка та ніжок, стан анкерного кріплення задовільний	3
Рамне кріплення сильно обтиснуте, деформоване. Планки замків відірвані, анкерне кріплення не в задовільному стані	4

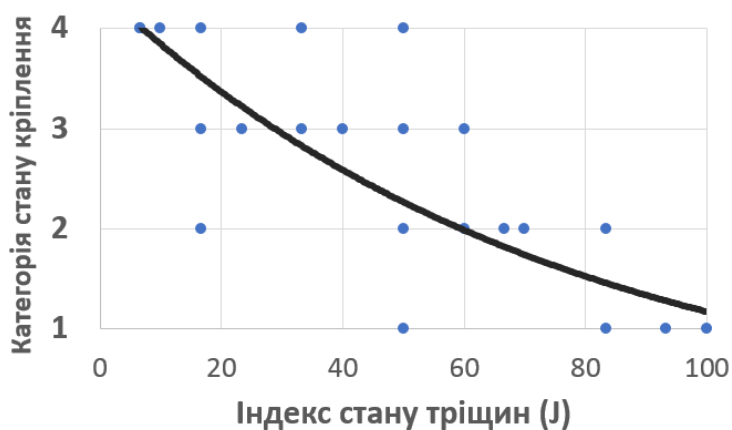


Рис. 4. Відповідність категорій стану кріплення стану поверхні тріщин J

Результати спостережень *in situ* показали необхідність приділення додаткової уваги впливу вологості на міцність порід. Тому в лабораторії НДЦ ГГТГС НТУ «Дніпровська політехніка» були проведені лабораторні випробування впливу зволоження на зразках пісковиків, алевролітів та аргілітів, що були вилучені на шахті «Самарська» ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля».

Встановлені залежності міцності зразків на одноосьовий стиск від міри їх зволоженості (рис. 5) та отримані емпіричні формули втрати міцності:

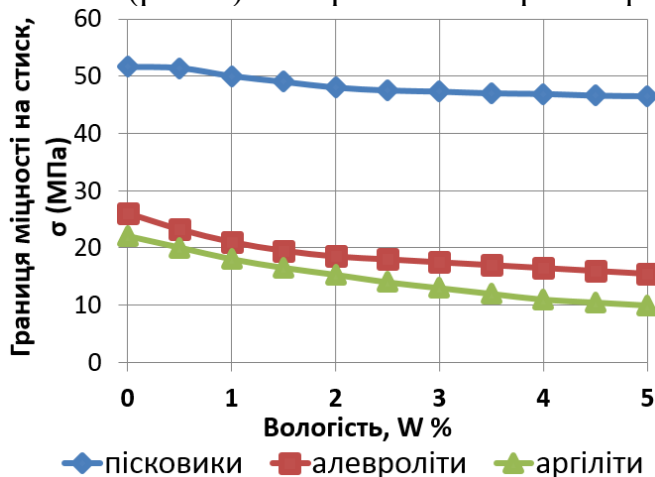


Рис. 5. Залежність міцності зразків гірських порід від їх вологості

Для пісковиків:

$$\sigma_W / \sigma_{ci} = -0,043 \ln(W) + 0,9655,$$

для алевролітів:

$$\sigma_W / \sigma_{ci} = -0,106 \ln(W) + 0,7863,$$

для аргілітів:

$$\sigma_W / \sigma_{ci} = 0,973 \cdot e^{-0,16W},$$

де σ_W - міцність гірської породи з вологістю W , σ_{ci} - міцність повітряно-сухого породного зразка одержана в лабораторних умовах.

В цілому, дослідження показали, що у водонасиченому стані міцність алевролітів і аргілітів в Західному Донбасі знижується в 1,5-2 рази;

На основі узагальнення результатів аналізу мікроструктури зразків порід, лабораторного тестування на стиснення, спостережень поведінки тріщинуватих порід навколо виробок в шахтних умовах автором розроблена власна рейтингова система кількісної оцінки стану поверхні тріщини (табл. 2).

Індекс стану поверхні тріщин (J)

Стан поверхні тріщини		Дуже шорсткі поверхні, не тривалі, без розділення порід, не вивітрені	Злегка шорсткі поверхні, незначне відділення, злегка вивітрені	Злегка шорсткі поверхні, відділення порід менш ніж 1 мм, сильно вивітрені	Гладко поліровані поверхні, відділення порід 1-5 мм, тривалі тріщини	М'яка кромка товщиною понад 5 мм або відділення порід понад 5 мм, тривалі тріщини
Довжина розриву		менш ніж 1 м	від 1 до 3 м	від 3 до 10 м	від 10 до 20 м	понад 20 м
контакт	сухий	20	16	12	6	1
	вологий	10	8	6	2	0
ступінь розкриття		відсутнє	менш ніж 0,1 мм	від 0,1 до 1 мм	від 1 до 5 мм	понад 5 мм
		20	16	12	6	0
Шорсткість		дуже шорсткі поверхні	шорсткі поверхні	злегка шорсткі поверхні	гладкі поверхні	гладко поліровані поверхні
контакт	сухий	20	16	12	6	1
	вологий	10	8	6	3	0
Наповнення		відсутнє	жорстке наповнення менш ніж 5 мм	жорстке наповнення понад 5 мм	м'яке наповнення менш ніж 5 мм	м'яке наповнення понад 5 мм
		20	16	12	6	0
Вивітріння		Не вивітрені	Злегка вивітрені	Помірно вивітрені	Сильно вивітрені	Дезінтегровані
		20	16	12	6	0
Максимальна сума балів (J)		100	80	60	30	2

Отриману функцію зниження міцності масиву залежно від індексу стану поверхні тріщин J апроксимовано поліномом другого ступеня:

$$f(J) = 0,5 - (0,045 \cdot J^2 + 0,38 \cdot J) \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Введення функції втрати міцності завершує побудову ймовірнісно-статистичної моделі структурно порушеного породного масиву шляхом уточнення коефіцієнту структурного послаблення. Визначення коефіцієнта структурного ослаблення, запропонованого О. Сдвижковою:

$$k_c = \frac{\sigma_{масиву}}{\bar{\sigma}} = \frac{\exp(t \cdot \sqrt{\ln(\eta^2 + 1)})}{\sqrt{\eta^2 + 1}}, \quad (4)$$

де основним аргументом є варіація значень міцності «виправленої» вибірки (2), яка визначається функцією зниження міцності (3). Тут $\bar{\sigma}$ - середнє значення міцності зразків гірської породи, що були випробувані в лабораторних умовах, t - аргумент нормованої функції розподілу Гауса при її значенні $1-P$, де P ймовірність, з якою визначається коефіцієнт структурного послаблення, і яка характеризує рівень значущості об'єкта.

Встановлена залежність (2) «виправленої» відносної варіації від відстані між тріщинами та значеннями функції зменшення міцності $f(j)$ дозволили розробити діаграму визначення коефіцієнту структурного послаблення (рис. 6).

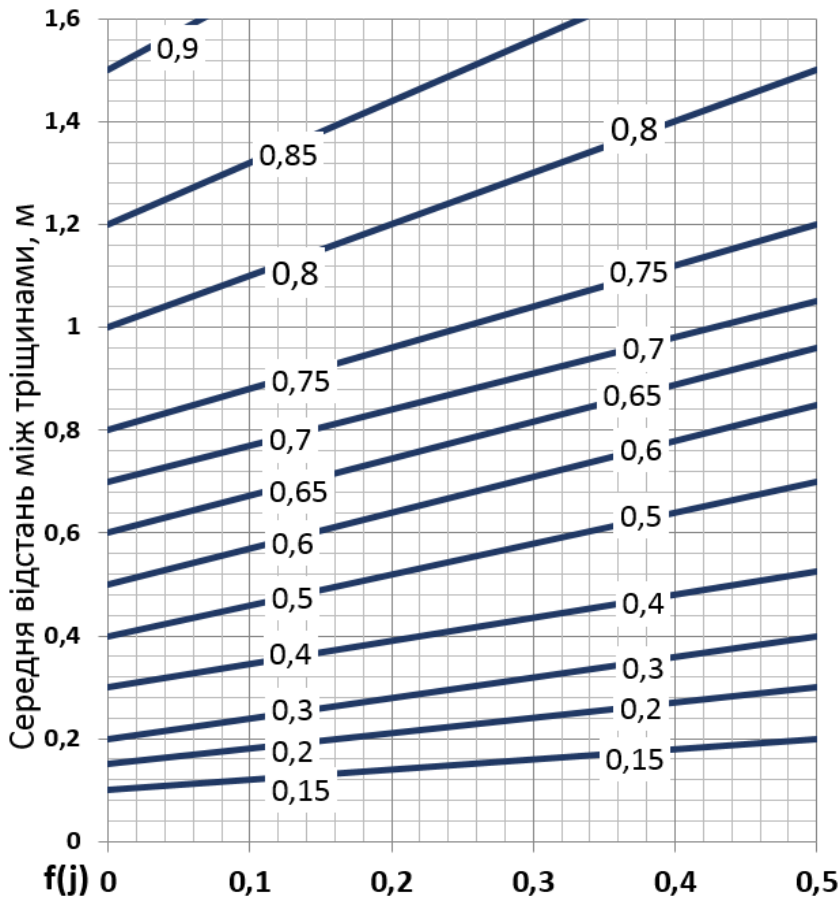


Рис. 6. Діаграма визначення коефіцієнта структурного послаблення k_c

$$k_{cE} = \frac{E_{\text{масиву}}}{E_{\text{зразка}}} = \exp \left[(50l_t f(\alpha)(f(j) - 1))^{-1} \right]. \quad (5)$$

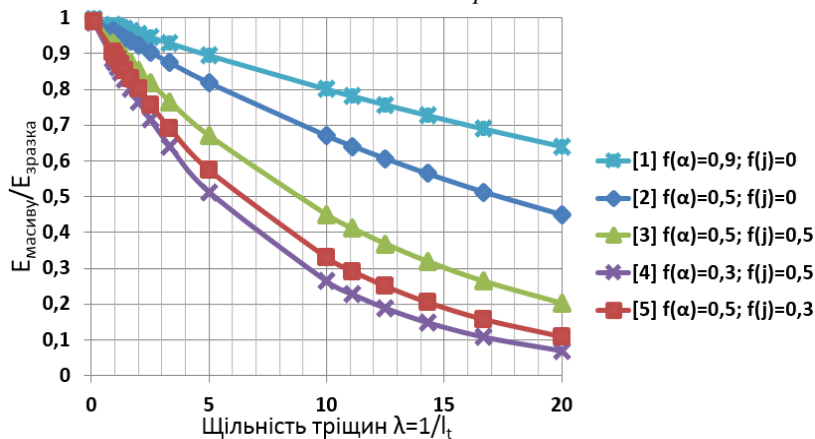


Рис. 7. До визначення коефіцієнту зниження модуля пружності

Таким чином, розвинуто ймовірно-статистичну модель механічного стану масиву, в якій враховано наявність в умовній статистичній сукупності зруйнованих елементів та елементів з аномально низькими міцнісними та деформаційними властивостями, що дозволило уточнити відносну варіацію вибірки, а відповідно, й коефіцієнт структурного послаблення, які відображають як внутрішню структурну

Діаграма є зручним інженерним інструментом, що дозволяє на початковій стадії гірничих робіт лише за результатами геологічних досліджень визначити коефіцієнт структурного послаблення.

Базуючись на результатах лабораторних випробувань та імітаційного моделювання, одержано коефіцієнт зниження модуля пружності тріщинуватого породного масиву (k_{cE}) з урахуванням відстані між тріщинами (l_t), кута нахилу тріщин ($f(\alpha)$) та стану поверхні тріщин ($f(j)$):

Візуалізація коефіцієнту зниження модуля пружності (рис. 7) показує, що у випадку наявності систем розкритих тріщин з вологими та гладкими поверхнями модуль Юнга знижується вдвічі порівняно з закритими тріщинами без зволоження (при інтенсивності тріщинуватості $\lambda=10$).

неоднорідність масиву, так і механічне його ослаблення системами тріщин, тобто враховують відстань між тріщинами, кут їх нахилу та стан поверхні розривів.

У **третьому розділі** з урахуванням функції зниження міцнісних та деформаційних властивостей виконано скінчено-елементний аналіз тривимірного НДС породного масиву з різним ступенем структурної порушеності навколо штучної порожнини. Для відображення пружно-пластичної поведінки порід використана деформаційна модель та критерій міцності Хока-Брауна:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{mk_c\sigma_c\sigma_3 + s(k_c\sigma_c)^2} \quad (6)$$

де σ_1 , σ_3 – головні напруження; m і s – матеріальні константи; σ_c – границя міцності на стиснення інтактного породного зразка. Тут k_c визначається за формулами (4), з урахуванням (2) та (3), завдяки чому враховуються параметри структурної порушеності масиву, а саме, відстань між тріщинами, кут нахилу тріщин та стан поверхонь розривів.

Встановлено закономірності впливу параметрів тріщинуватості на переміщення контуру протяжної підземної виробки (рис. 8) та з використанням методу множинної кореляції отримано математичний опис функції ΔU , що характеризує відносний приріст переміщень залежно від відстані між тріщинами (l_t) та індексу стану поверхні тріщин (J). Аналіз можливих регресійних моделей показав найбільшу адекватність експоненційної моделі:

$$\Delta U = \exp(0,5 - 2,55 \cdot l_t - 0,05 \cdot J + 0,01 \cdot l_t \cdot J) \quad (7)$$

при цьому коефіцієнт детермінації склав $R^2=0,94$.

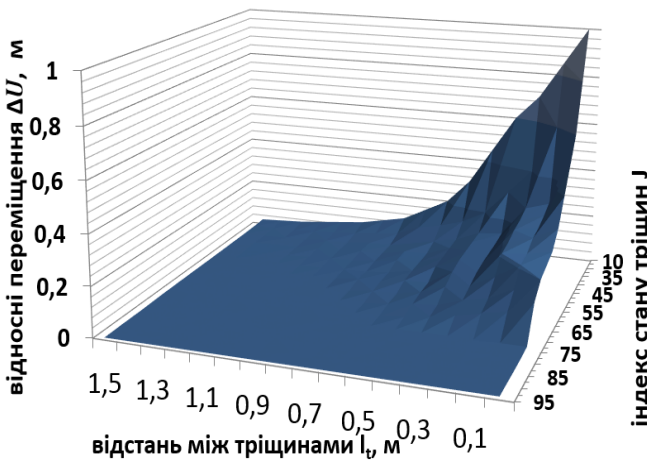


Рис. 8. Поверхня відгуку функції ΔU

Аналіз поверхні (7) (рис. 8) показує, що при зменшенні середньої відстані між тріщинами вплив стану поверхні розривів зростає. Так при відстані між тріщинами 1,0 м і зміні індексу стану контакту від $J=40$ (злегка шорсткі поверхні, розкриття контактів менш ніж 1 мм, сухий контакт) до $J=20$ (гладко поліровані поверхні, відділення порід 1-5 мм, тривалі тріщини, вологий контакт) максимальні переміщення на контурі виробки збільшуються на 30%.

При відстані між тріщинами 0,2 м і зміні індексу стану контакту від $J=40$ до $J=20$ максимальні переміщення на контурі виробки збільшуються в 2,5 рази.

Встановлено закономірності впливу параметрів тріщинуватості на розміри зони непружних деформацій навколо протяжної підземної виробки при різних значеннях параметру розробки γ_H/σ (за Ю. Заславським), де γ_H - вертикальна складова початкового поля напружень, σ - міцність породного масиву з урахуванням структурної порушеності. На основі узагальнення багатоваріантного моделювання побудована регресійна модель зміни висоти зони непружних деформацій у вигляді добутку показникових функцій:

$$h_{знд} = 1,125 \cdot 15,97^{\gamma H/\sigma} \cdot 0,23^{l_t} \cdot 0,98^J; R^2=0,92, \quad (8)$$

яка демонструє збільшення зони непружних деформацій, а відповідно й навантаження на кріплення виробки із збільшенням параметру умов розробки ($\gamma H/\sigma$), зменшенням відстані між тріщинами (l_t) та індексу стану тріщин J (рис. 9).

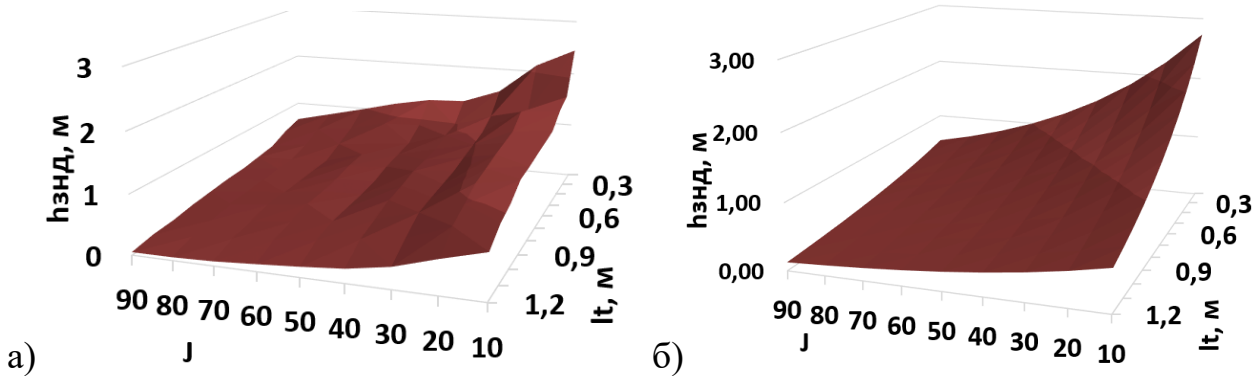


Рис. 9. Функція $h_{знд}$ при значенні параметру розробки: $\gamma H/\sigma=0,5$:
а – результати моделювання; б – апроксимація залежністю (8)

Алгоритм метода скінчених елементів (МСЕ), реалізований в середовищі «RS3», дозволив визначати напружено-деформований стан (НДС) досліджуваної області масиву на різних стадіях розвитку прохідницьких робіт. Використана опція програми RS3, що дозволяє моделювати покрокову зміну напружено-деформованого стану масиву шляхом зміни граничних умов. При цьому, компоненти НДС, що отримані на попередній стадії, враховуються на наступному етапі рішення. Таким чином моделюється «накопичення» деформацій та імітується квазістатичний процес посування вибою виробки. Завдяки даній процедурі проаналізовано вплив прохідницького вибою на розвиток та стабілізацію переміщень контуру виробки при різних параметрах тріщинуватості стохастично неоднорідного породного масиву.

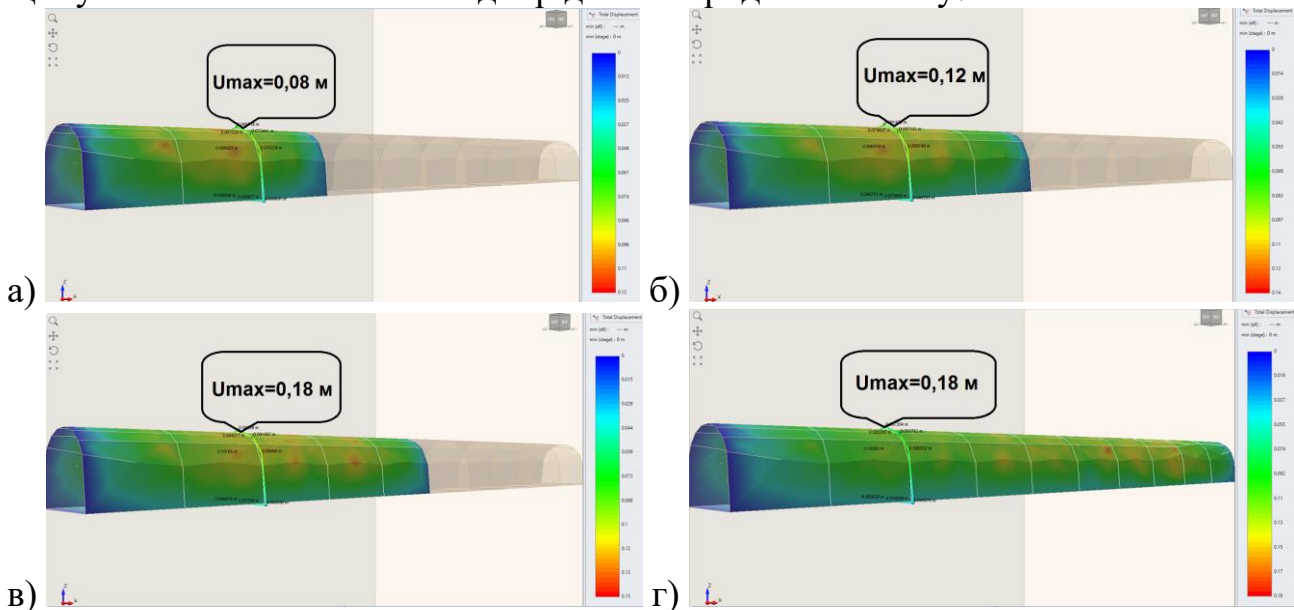


Рис. 10. Розвиток та стабілізація переміщень контуру виробки на різних стадіях просування вибою, коли він відійшов від контуру вимірювання: а - на 5 м; б - на 10 м; в - на 15 м (стабілізація переміщень); г - на 40 м

Постадійний процес організовано на довжину 50 м, при вихідних даних: відстань між тріщинами l_t (від 0,2 до 1,2 м), індекс стану поверхонь розривів J (від 1 до 100), співвідношення початкового поля напружень до межі міцності на одноосьове стиснення інтактного масиву (γ_H/σ) вибрано 0,5. На рис. 10 у кольоровій гамі відображено розвиток переміщень контуру виробки на різних стадіях просування вибою при відстані між тріщинами 0,8 м та значенні індексу стану поверхні тріщини – 60.

Аналіз показує, що для вказаних параметрів переміщення контуру виробки збільшуються від 0,08 до 0,18 м при просуванні вибою на відстань 5 та 10 м (рис. 10 - а,б), а стабілізація приросту переміщень спостерігається вже при відстані 15 м від контуру вимірювання (рис. 10-в), після цього переміщення практично не змінюються (рис. 10-г). Але при погіршенні якості масиву (зменшенні відстані між тріщинами до 0,2 м та погіршенні умов контакту від $J=60$ до $J=20$) відстань від вибою, на якій переміщення стабілізуються, зростає до 35-40 м. Визначений параметр є важливим при вирішенні питання щодо необхідної податливості кріплення та переводу металевого кріплення в «жорсткий» режим. На діаграмах (рис. 11) наведені значення переміщень у характерних точках контуру виробки у підшві (точка вимірювання №2), покрівлі (точка вимірювання №4) та боках (точки вимірювання №1 та №3) залежно від відстані до вибою при різних показниках тріщинуватості.

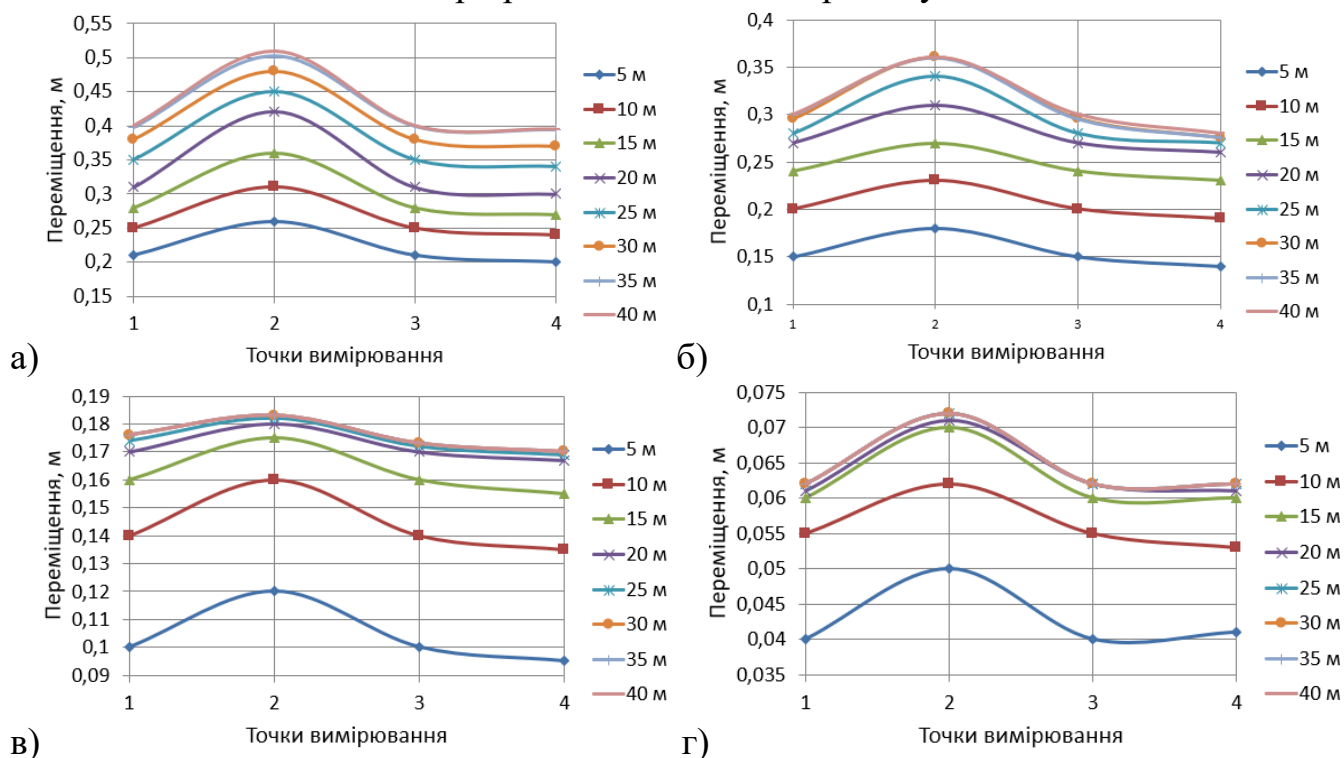


Рис. 11. Зміщення контуру виробки залежно від відстані до вибою для різних значень якості породного масиву, що враховує середню відстань між тріщинами та якість їх поверхонь: а - середня відстань між тріщинами $l_t=0,2$ м, індекс якості поверхні $J=20$; б - $l_t=0,4$ м, $J=40$; в - $l_t=0,8$ м, $J=65$; г - $l_t=1$ м, $J=90$

Аналіз результатів моделювання дозволив встановити зв'язок між показниками тріщинуватості масиву гірських порід та відстанню до вибою, на якій відбувається стабілізація переміщень (рис. 12, 13). Регресійна залежність встановлена у вигляді добутку показникових функцій, при цьому коефіцієнт детермінації складає $R^2=0,98$.

$$d = 65 \cdot 0,3^l \cdot 0,99^J, \quad (9)$$

Узагальнення одержаних результатів дозволило на основі аналізу відповідності переміщень контуру виробки параметрам структурної порушеності масиву розробити нову класифікацію масиву (табл. 3), що встановлює зв'язок між категоріям стійкості, переміщеннями контуру протяжної виробки, відстанню до прохідницького вибою, на якій відбувається стабілізації переміщень, та характеристиками структури (якістю) породного масиву.

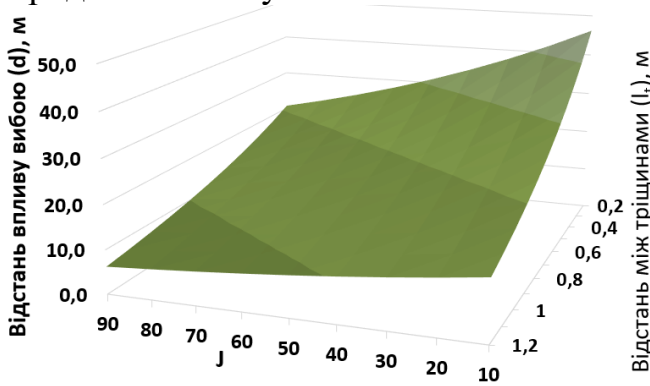


Рис. 12. Відстань до вибою, на якій відбувається стабілізація переміщень, залежно від параметрів тріщинуватості

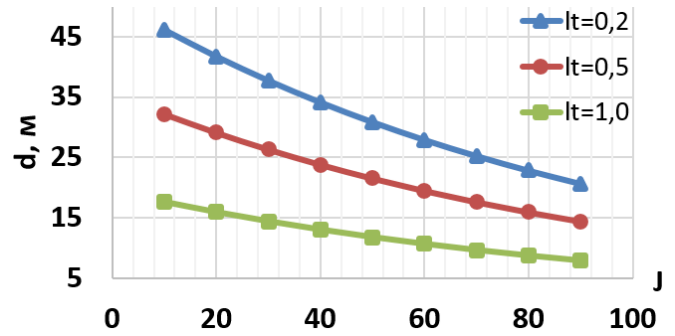


Рис. 13. Відстань до вибою, на якій відбувається стабілізація переміщень, для характерних значень інтенсивності тріщинуватості

Таблиця 3
Категорії стійкості порід з урахуванням тріщинуватості

Категорія стійкості порід	Оцінка стану стійкості порід	Переміщення U , мм	Середня відстань ніж тріщинами, м та індекс J_c	Опис структури масиву	Середня відстань до прохідницького вибою на якій реалізується стабілізація переміщень
I	Стійкий	До 50	Понад 1 м $75 < J \leq 100$	добре зчеплений породний масив, що складається з блоків кубічної форми з взаємно пересіченими системами тріщин	15 м
II	Середньо стійкий	від 50 до 200	від 0,5 до 1 м $50 < J \leq 75$	частково порушений масив з багатограничними блоками, утворений перетином 4-х або більше систем тріщин	20 м
III	Нестійкий	від 200 до 500	від 0,2 до 0,5 м $25 < J \leq 50$	шаруватий складчастий масив з включеннями частин круглої і багатокутної форми.	30 м
IV	Дуже нестійкий	понад 500	менш ніж 0,2 м $0 < J \leq 25$	слабо зв'язаний, дезінтегрований, сильно порушений масив	40 м

Аналіз розвитку ЗНД навколо протяжної виробки показав, що аналогічно розвитку переміщень, стабілізація приросту зони руйнування реалізується на відстані від вибою, що залежить від «якості» масиву, тобто від параметрів тріщинуватості.

Визначений таким чином максимальний розмір зони непружних деформацій обумовлює навантаження на кріплення в момент переходу його в «жорсткий» режим. На рис. 14 візуалізовано приріст зони руйнування навколо виробки за середньої відстані між тріщинами $l_f=0,8$ м та індексу стану поверхні тріщини – $J=60$.

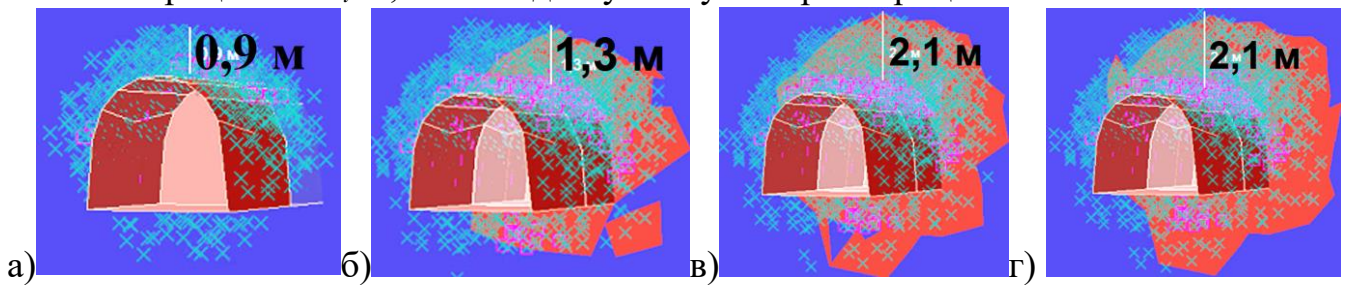


Рис. 14. Розвиток та стабілізація зони непружних деформацій навколо контуру виробки на різних стадіях просування вибою: а) вибій відійшов на 5 м; б) вибій відійшов на 10 м; в) вибій відійшов на 15 м (стабілізація переміщень); г) вибій відійшов на 40 м

Одержані закономірності використані при прогнозуванні геомеханічної ситуації під час проведення відкотного та дренажного квершлагів пл. C_{10}^B шахти «Самарська» в небезпечній зоні тектонічного порушення «Богданівський скид». Завдяки достовірному прогнозу розвитку переміщень та формуванню навантаження на кріплення, а також виконанню відповідного комплексу робіт забезпечена довгострокова стійкість квершлагів в зоні геологічного порушення. Розробка схем кріплення ділянок виробок, що розташовані в зонах породного масиву з різним ступенем структурної порушеності, базувалась на чисельному моделюванні, в якому за методикою автора враховані такі специфічні риси як зволоження та дезінтегрованість породної маси. Задовільний експлуатаційний стан квершлагів підтвердив адекватність розроблених моделей та правомірність методології визначення інтегрованої характеристики «якість масиву» на основі статистично-ймовірнісного підходу.

У четвертому розділі дослідження зосереджені на моделюванні геомеханічної системи «підготовча виробка - охоронний елемент - лава». Як елемент охорони дільничної виробки розглянута лита смуга з суміші Бі-кріплення, що використовується в будівництві для зведення конструкцій, та застосована для охорони виробок в умовах ШУ «Покровське». На початковому етапі досліджень (сумісно з к.т.н. Гаркушою В.С.) виконані лабораторні випробування зразків порід і матеріалу литої смуги з метою визначення їх фізико-механічних властивостей. За методикою, що описана у розділі 2, встановлено коефіцієнти зниження міцнісних та деформаційних характеристик порід залежно від параметрів тріщинуватості породного середовища. Розраховані таким чином стохастичні оцінки фізико-механічних характеристик порід дозволили сформулювати чисельну модель і провести обчислювальний експеримент великого обсягу з метою дослідження функціональної стійкості дільничної виробки.

При складанні плану обчислювального експерименту вибиралося число можливих комбінацій факторів, достатнє для побудови залежностей цільових функцій від варійованих факторів, а також отримання загальної аналітичної моделі, що дозволяє при заданому обмеженні (допустимому зменшенні перерізу виробки) визначити для даної міцності порід і потужності пласта необхідну ширину литої смуги з Бі-кріплення. Моделювались ширина литої смуги в інтервалі від 0,6m до 0,8m, де m –

потужність пласта, яка для умов ШУ «Покровське» змінюється від 1,2 до 2,0 м; міцність порід підшви в діапазоні від 20 до 80 МПа, та міцність литої смуги R_n від 15 до 50 МПа. Результатом моделювання є статистична сукупність напружень, деформацій та переміщень порід (рис. 15), а також зони непружних деформацій (руйнування) навколо виробки (рис. 16) на різних стадіях очисних робіт.

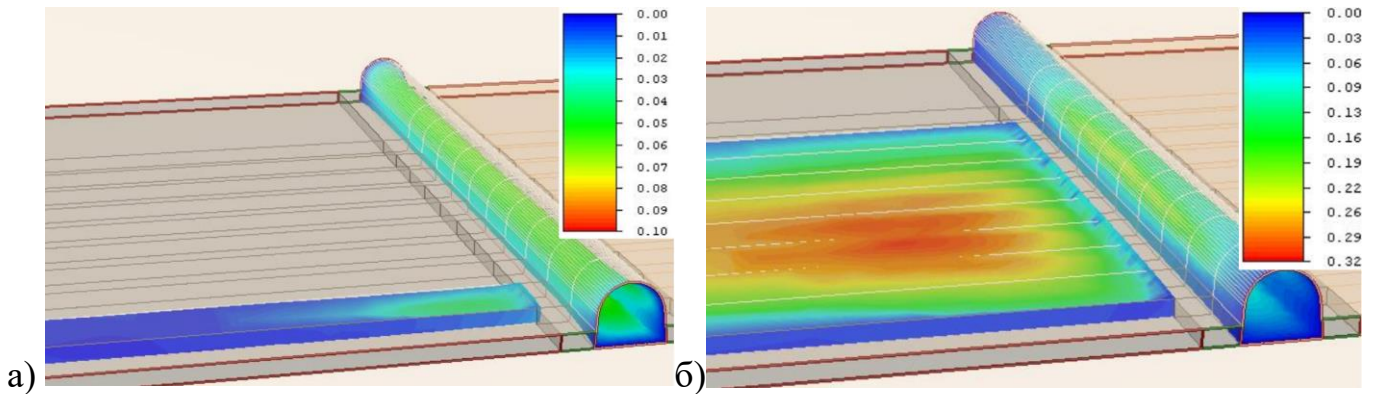


Рис. 15. Переміщення системи «виїмковий штрек - лава» на різних стадіях просування вибою лави: а - вибій лави просунувся на 5 м; б - на 40 м;

Розмір і конфігурація зони непружних деформацій встановлювались на основі критерію Хока-Брауна з урахуванням параметрів тріщинуватості через коефіцієнт структурного послаблення.

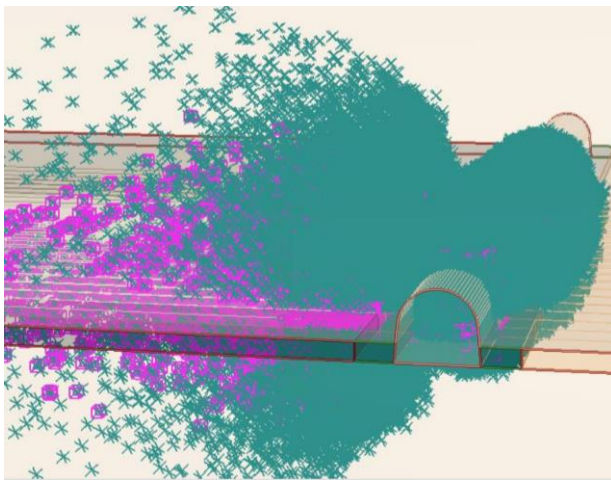


Рис. 16. Конфігурація зони непружних деформацій навколо системи «виїмковий штрек - лава» при просуванні вибою лави на 40 м. * - точки, в яких руйнування походить від дотичних напружень, ■ - точки, в яких реалізовано руйнування від розтягуючих напружень.

Для кожного варіанту моделювання обчислювалась вертикальна конвергенція порід (рис. 17), що є практичним індикатором стійкості виробки з точки зору її функціонального призначення.

Для виявлення основних геологічних і технічних факторів, що впливають на досліджувану стійкість підготовчої виробок при охороні литою смугою з Бі-кріплення на основі методу структурної ідентифікації та групового урахування аргументів (МГУА) розроблена методика побудови математичної моделі втрати висоти виїмкового штреку в залежності від домінуючих факторів. Для того, щоб забезпечити якісні прогностні властивості моделі, тобто стійкість моделі відносно до нових даних, алгоритм МГУА передбачає розділення всього набору значень на дві частини. Перший набір даних використовується для побудови моделі (навчальна підвибірка), другий

набір даних виконує роль нових даних і використовується для перевірки якості побудованої моделі (перевірочна підвибірка).

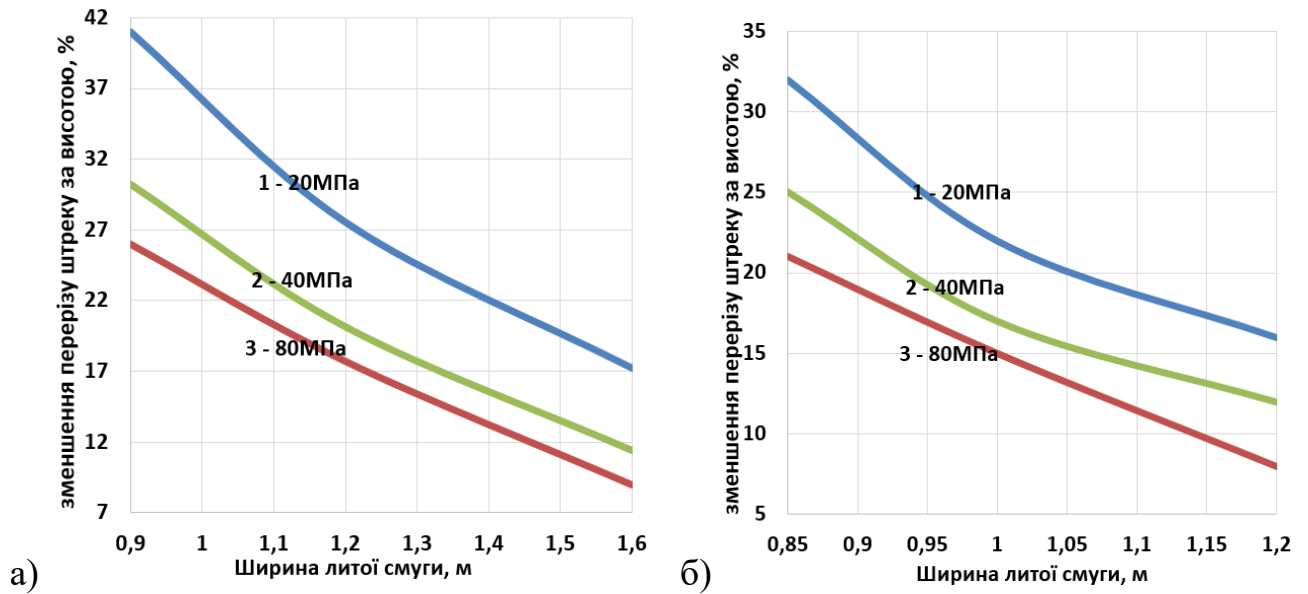


Рис. 17. Узагальнені графіки втрати перерізу по висоті виробки (%) за різної міцності порід підосви і ширині литої смуги:

а - потужність пласта 2 м; б - потужність пласта 1,4 м

Побудована прогностична модель вертикальної конвергенції (втрати перерізу за висотою виробки, Δh , м) в залежності від чотирьох чинників: потужності пласта (m , м), ширини литої смуги (w , м), міцності порід підосви (σ , МПа) і міцності литої смуги (R_n , МПа) має вигляд:

$$\Delta h = 0,88 \cdot \frac{m}{w} - 0,0047 \cdot \left(\sigma \cdot m - \frac{\sigma}{\sqrt[3]{R_n}} \right). \quad (10)$$

Коефіцієнт детермінації моделі складає 0,97 для навчальної вибірки та 0,99 для перевірконої вибірки – середній коефіцієнт детермінації $R^2=0,98$. Максимальне від'ємне та додатне відхилення для перевірконої вибірки не перевищує (-0,08) та 0,06 м відповідно.

На основі комбінаторного алгоритму структурної ідентифікації моделі оцінено вплив кожного фактору на результуючу змінну (зменшення перерізу за висотою виробки, Δh , м): ширина литої смуги (w) – 48 %, потужність вугільного пласта (m) – 25 %, міцності порід підосви (σ) – 23 %, міцність литої смуги з Бі-кріплення (R_n) – 4 %.

На основі виконаних досліджень розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів литої смуги в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». Досвід експлуатації виробки (конвеєрного штреку 14-ї південної лави) показав, що в умовах тріщинуватих слабких порід покрівлі та підосви (20-30 МПа) вертикальна конвергенція не перевищує 0,9 м, тобто складає 20% висоти виробки при раціонально обраній ширині литої смуги (не менше 0,8 потужності пласта), що є функціонально задовільним для подальших операцій, в тому числі при повторному використанні штреку як вентиляційної виробки для наступної лави.

У п'ятому розділі проаналізовано геомеханічні процеси в породному масиві при послідовному відпрацюванні вугільного пласта лавами таким чином, що конвеєрний штрек попередньої лави використовується повторно як вентиляційний штрек наступної лави.

В умовах шахт Західного Донбасу стійкість виробок, що планується використовувати двічі, забезпечується таким чином: на першому етапі при проведенні підготовчої виробки навколо її контуру формують стійке армоване породне склепіння за допомогою сталеполімерних анкерів для забезпечення стійкості до початку впливу очисних робіт; на другому етапі при розвитку очисних робіт, однак, до потрапляння виробки в зону впливу вибою лави, що наближається, у виробці встановлюють підсилюючу систему «канатний анкер-активна балка», яка «підшиває» рамне кріплення до непорушеного масиву і забезпечує їх спільну роботу; на третьому етапі після виїмки вугільного пласта поблизу виробки з боку виробленого простору встановлюють суцільну охоронну конструкцію, що запобігає опусканню покрівлі над виробленим простором після проходу лави. При цьому особлива увага повинна бути сконцентрована на високій жорсткості цього елемента, достатньої для забезпечення так званого «обрізання» масиву за межами сталого склепіння.

З метою виявлення ролі різних елементів підтримання і охорони виробок, для кожного вказаного етапу робіт, на основі скінчено-елементного аналізу визначено тривимірний напружено-деформований стан масиву. Початкові значення фізико-механічних характеристик порід прийняті відповідно до даних геологічної служби шахти «Степова» ПрАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля».

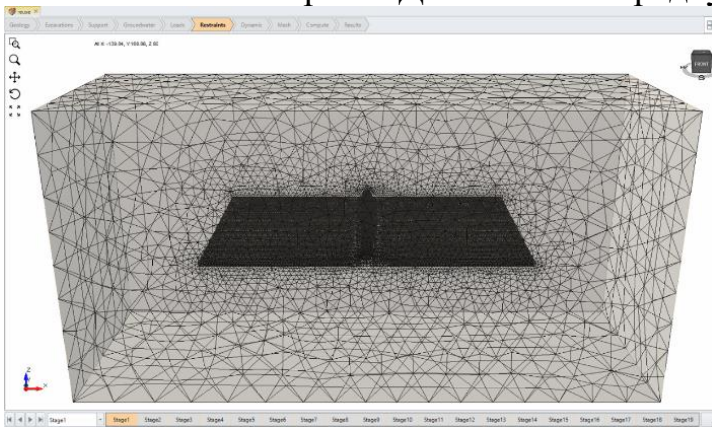


Рис. 18. Розрахункова схема для покрокового визначення компонентів напружено-деформованого стану системи «лава - підготовка виробка - лава»

Оскільки для порід Західного Донбасу характерні слабкі породи, що вміщують вугільний пласт, та розвинена інтенсивна тріщинуватість з утворенням блоків, «дзеркал ковзання», а також обводнення порід, значення міцності та модуля деформацій скореговані за методикою, описаною в розділі 2. Розроблено розрахункову схему до тривимірного моделювання поетапної зміни стану виїмкової виробки під впливом виробленого простору двох лав (рис. 18).

На етапі 1 в інтактному масиві моделюється підготовча виробка, на етапі 2 шляхом зміни граничних умов додається порожнина, що імітує першу лаву (рис. 19-а). При цьому вироблений простір формується також за n додаткових кроків, які імітують поступове посування очисного вибою. На кожному кроці оцінюються характеристики НДС породного масиву. На етапі 3 (рис. 19-б) також за n кроків додається порожнина, що імітує другу лаву. На цій стадії вироблений простір першої лави заміщується матеріалом, що імітує дезінтегровану гірську масу після обвалення порід

покрівлі. Імітація посування очисного вибою дозволяє оцінити вплив очисних робіт на стан штреку попереду і позаду лави.

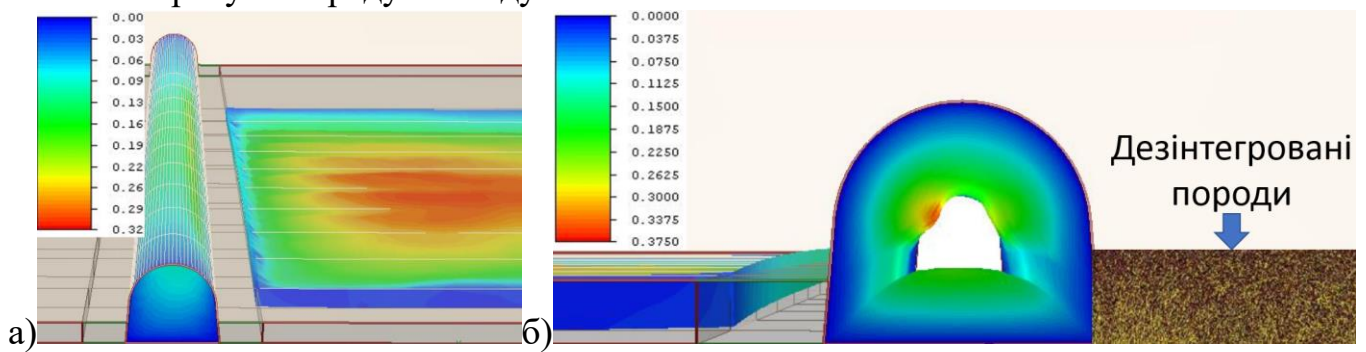


Рис. 19. Розвиток переміщень при формуванні порожнин в породному масиві: а - формування виробленого простору першої лави; б - формування виробленого простору другої лави та заповнення першої лави дезінтегрованою масою

На кожному кроці моделювання оцінюються також розміри і конфігурація зон руйнування відповідно до критерію Хока-Брауна (рис. 20).



Рис. 20. Зони руйнування навколо виробок: а - формування виробленого простору першої лави; б - формування виробленого простору другої лави та заповнення першої лави дезінтегрованою масою; в - просування вибою другої лави

Для більш детального аналізу впливу елементів кріплення та охорони, порядку їх встановлення та характеристик на компоненти напружено-деформованого стану в різних перерізах системи використані двовимірні розрахункові схеми. Причому, при переході до плоских перерізів напруження, що отримані в тривимірній моделі, використовуються як граничні умови.

В результаті моделювання анкерної системи (використано опції програми PHASE-2 – *Fully Bonded bolts*) показано, що своєчасне встановлення сталеполімерних анкерів відразу після проведення підготовчої виробки стримує розвиток переміщень порід і зони руйнування навколо виробки. Максимальний ступінь проявів опорного тиску спостерігається при сполученні штреку і лави в момент зняття ніжки рамного металевих кріплення. Для уникнення складкоутворення в покрівлі і боках виробки та мінімізації конвергенції порід встановлюється система активного посилення попереду очисного вибою з використанням канатних анкерів довжиною 6–8 м. Для моделювання канатних анкерів використовується елемент *Plain Strand Cable*, який дозволяє розтягування, але не працює на вигін. За умови дворівневого анкерування безпосередньо над виробкою зберігається область незруйнованих порід (рис. 21-а) і верхній кінець канатного анкеру закріплюється полімерними смолами в стійкій, незруйнованій області. При сполученні з другою лавою ця тенденція зберігається (рис. 21-б).

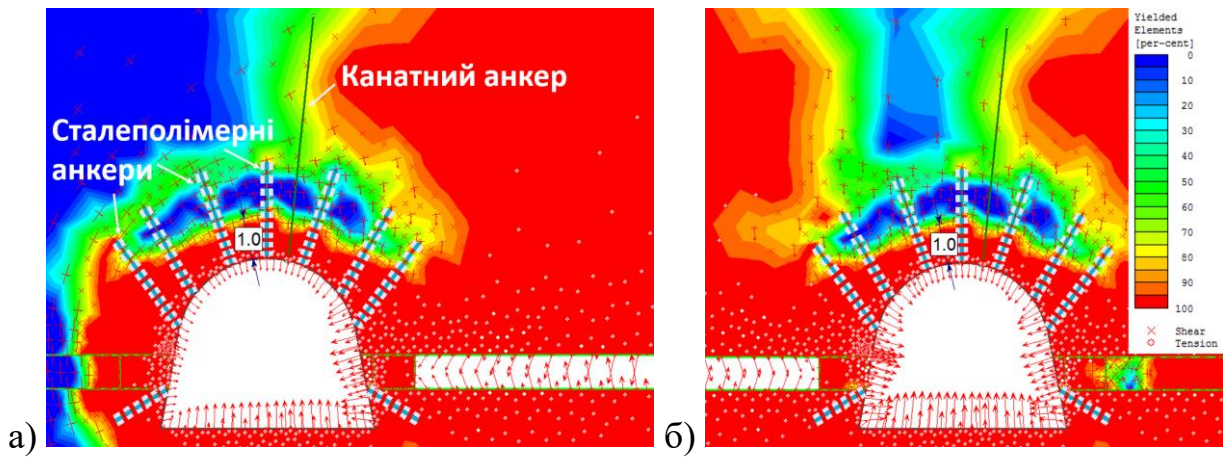


Рис. 21. Зони руйнування навколо сполучення штреку і лави при охороні виробки накатною смугою підвищеної жорсткості (дерев'яні елементи з заповненням піщано-цементною сумішшю): а - після установки першого анкера і проходу першої лави; б - після проходу другої лави;

Дворівневе анкерне кріплення при сполученні штреку з лавою є ефективним лише за умови достатньої жорсткості охоронного елемента. У зв'язку зі сформованими в даний час цінами на ринку матеріалів, найбільш доступними для створення охоронної споруди є лісоматеріали. При цьому найбільшу несучу здатність мають суцільні дерев'яні конструкції – накатні смуги з кругляка або бруса. Недоліком конструкції є висока небезпека загоряння. Одним із способів зниження пожежонебезпеки є нагнітання піщано-цементного розчину в простір між брусами. Це дозволяє певною мірою ізолювати дерев'яні елементи, крім того заповнення пустот запобігає прослизанню брусів один щодо одного і, таким чином, підвищує жорсткість охоронного елемента.

Однією з цілей моделювання є встановлення впливу жорсткості конструкції на стан масиву навколо сполучення підготовчої виробки та лави. Жорстка накатна смуга моделювалася як матеріал, що складається з шарів з властивостями деревини. Шари відділені один від одного спеціальними контактами - межами послаблення, (*joint boundary*), уздовж яких може мати місце прослизання. Параметрами, що регулюють загальну жорсткість конструкції в моделі є ширина накатної смуги, модуль деформації матеріалу полоси, а також коефіцієнти нормальної і тангенціальної жорсткості контактних елементів, які визначаються товщиною контакту і властивостями матеріалу-заповнювача.

Результати обчислень показали, що збільшення коефіцієнту нормальної жорсткості контактного елемента зменшує вертикальну конвергенцію порід у виробці на 12%, а горизонтальну - на 5% (рис. 22). В цілому, при поєднанні дерев'яних елементів і піщано-цементної суміші залишкова площа перерізу виробки на 12% більше, ніж у випадку застосування тільки дерев'яних елементів.

Аналіз показує, що вертикальна конвергенція переміщень виробки має вигляд зростаючої в сторону менших аргументів функції степеневого вигляду:

$$\frac{\Delta h}{h} (\%) = 53 \cdot k_n^{-0.1}.$$

Горизонтальна конвергенція краще описується експоненціальною залежністю:

$$\frac{\Delta b}{b} (\%) = 19 \cdot \exp(-0.3 \cdot 10^{-4} \cdot k_n).$$

В обох випадках коефіцієнт детермінації моделей (R^2) перевищує 0,95.

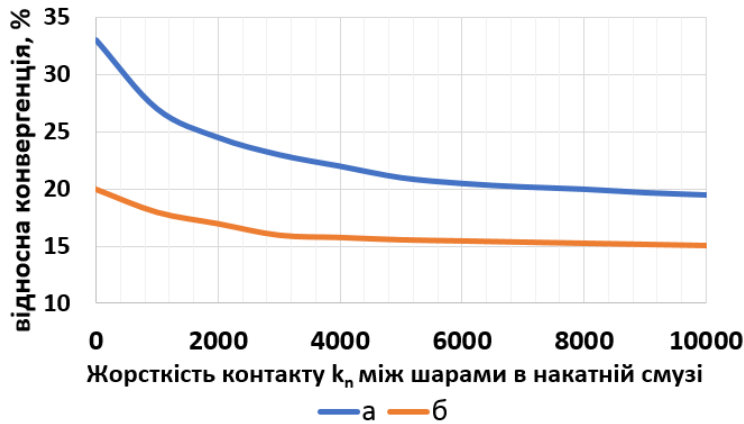


Рис. 22. Залежність відносної конвергенції порід від жорсткості контакту елемента: а - вертикальна конвергенція; б - горизонтальна конвергенція

Не зважаючи на те, що введення коефіцієнту жорсткості контактних елементів в розрахункову схему є лише засобом моделювання, з отриманих співвідношень витікає, що будь-які заходи щодо ущільнення матеріалу (заповнення пустот, запобігання ковзанню окремих часток) буде підвищувати жорсткість конструкції і, як наслідок, зменшувати деформації всієї системи «оголення - опорний елемент».

З використанням розробленої методики багатофакторного аналізу, що базується на сучасних алгоритмах структурної ідентифікації та індуктивному підході до створення прогностичних математичних моделей, введено інтегральний показник забезпечення стійкості підготовчих виробок – відносне значення площі перерізу підготовчої виробки, яка буде збережена після сполучення з другою лавою (S). При цьому початковими даними для багатофакторного аналізу обрано параметри, значущість яких обґрунтована попередніми дослідженнями, а саме: «відносна ширина охоронного елемента» (w/m), з діапазоном варіювання від 0,6 до 0,8; жорсткість контакту в охоронному елементі (k_n) з інтервалом варіювання від 0 до 10^4 МПа/м; «відносна кількість анкерів на площу перерізу виробки» (N_a), який змінюється від 0 (анкерування відсуне) до 0,6 (11 анкерів, віднесених до площі перерізу $17,7 \text{ м}^2$); «крок встановлення металевих аркових кріплень» (q) з діапазоном варіювання від 0,5 до 1 м та параметр розробки, тобто відношення початкового поля напружень γH до межі міцності масиву з урахуванням стохастичної структурної порушеності (інтервал 0,3 - 0,7).

За мінімумом зовнішнього критерію за найбільш адекватну прогностичну модель було обрано залежність, яка згенерована на основі МГУА за ітераційним алгоритмом:

$$S = \frac{w}{m} \cdot \left(218N_a - 14 \frac{\gamma H}{\sigma} \right) + 0.017k_n^{2/3} - 186N_a^2 - 9,9q^2 + 25. \quad (11)$$

Коефіцієнт детермінації складає 0,94 для навчальної підвибірki даних та 0,92 для перевірконої. Середнє значення для всієї вибірки даних, що досліджувалась, складає $R^2=0,93$. Вплив кожного фактору за ваговими коефіцієнтами на результуючий показник становить: «відносна кількість анкерів на площу перерізу виробки» (N_a) – 32%, «відносна ширина охоронного елемента» (w/m) – 28%, «крок встановлення

металевого аркового кріплення» (q) – 18%, параметр розробки ($\gamma H/\sigma$) – 13% та жорсткість контактних елементів (k_n) – 9%.

Для встановлення найбільш раціонального поєднання факторів з метою збереження максимального перерізу підготовчої виробки розв'язано задачу умовної нелінійної оптимізації функції багатьох змінних (11) на основі алгоритму приведенного градієнту Франка-Вульфа. Встановлено, що при найкращому поєднанні вхідних змінних прогнозується збереження до 68% площі перерізу підготовчої виробки. Максимум досягається при таких значеннях змінних: $N_a = 0,47$; $w/m = 0,8$; $q = 0,5$; $k_n = 10000$, $\gamma H/\sigma = 0,3$. Причому вказані значення факторів (N_a , w/m , q , k_n) є оптимальними для всіх значень параметру розробки з інтервалу варіювання (від 0,3 до 0,7).

Результати моделювання елементів кріплення та охорони дільничних виробок впроваджено на шахті «Ювілейна» ПрАТ ДТЕК «Павлоградугілля», для якої характерні складні гірничо-геологічні умови: горизонти 350-400 м, слабкі породи покрівлі та підосви, наявність плікативних і диз'юнктивних порушень вугільного пласта. У цих умовах при охороні конвеєрного штреку 128-ої лави накатна смуга шириною 0,8 м виконана з задуванням піщано-цементною сумішшю. Після проходу другої лави переріз виробки зменшився лише на 25-30 %. Збереження 70 % перерізу штреку для умов даної шахти є дуже хорошим результатом, який забезпечив повторне використання цієї виробки з мінімальними витратами на ремонтно-відновлювальні роботи. Забезпечення стійкого стану виробки призвело до збільшення середньодобового видобутку до рівня 2000 т/добу (+14%). Економічний ефект, досягнутий в порівнянні з аналогічною 126-ю лавою складає 66,9 млн. грн.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вдосконалення ймовірнісно-статистичних алгоритмів та вперше встановлених закономірностей впливу таких ознак структури масиву як інтенсивність тріщинуватості, стан поверхні розривів, а також обводнення порід на компоненти тривимірного напружено-деформованого стану масиву на різних стадіях гірничо-видобувних робіт, з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей середовища вирішена актуальна наукова проблема удосконалення прогнозу стійкого стану структурно та техногенно порушеного масиву, що має важливе значення для підвищення ефективності та безпеки видобутку вугілля в Україні.

Виконані у даній дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки:

1) Розвинено підходи до кількісної оцінки структурної порушеності неоднорідного породного середовища шляхом встановлення на основі лабораторних випробувань, натурних спостережень та імітаційного моделювання функції зниження міцнісних і деформаційних характеристик порід й розроблені узагальнені ймовірнісно-статистичні алгоритми врахування таких ознак «якості» масиву, як інтенсивність тріщинуватості, кут нахилу тріщин, стан контактів поверхні тріщин та обводнення порід.

2) На основі алгоритму урахування структурних порушень масиву встановлено закономірності впливу параметрів тріщинуватості на переміщення контуру протяжної

підземної виробки при різних значеннях параметру розробки ($\gamma H/\sigma$). Показано, що при всіх значеннях цього параметру переміщення контуру виробки збільшуються майже в 2,5 рази при зменшенні відстані між тріщинами (від 1,2 до 0,1 м) та введеного у розгляд індексу стану поверхні тріщин (J), який комплексно оцінює міру розкриття та зволоженості поверхонь втрати суцільності (від 100 до 1), причому при зменшенні середньої відстані між тріщинами вплив стану поверхні тріщин експоненційно зростає.

3) Встановлено показникову залежність висоти зони непружних деформацій (ЗНД) навколо виробки від параметру розробки ($\gamma H/\sigma$), індексу стану поверхні тріщин (J) та відстані між тріщинами (l_i), причому розмір ЗНД збільшується при зростанні показника розробки та зменшенні відстані між тріщинами, а також індексу стану поверхонь тріщин. Це дозволяє визначати вагу порід, що створює навантаження на кріплення виробки та обґрунтовано проектувати параметри кріплення в складноструктурному породному масиві.

4) На основі тривимірного моделювання покровоного посування прохідницького вибою встановлено зв'язок між показниками структурної порушеності породного масиву та відстанню до вибою, на якій відбувається стабілізація переміщень. Регресійна залежність встановлена у вигляді добутку показникових функцій. Аналіз показує, що при погіршенні «якості» масиву (зменшенні відстані між тріщинами до 0,2 м та погіршенні умов контакту від $J=60$ до $J=20$) відстань від вибою, на якій переміщення стабілізуються, зростає від 15-20 м до 35-40 м.

5) Для умов ШУ «Покровське» виконано скінчено-елементний аналіз тривимірного напружено-деформованого стану породного масиву навколо сполучення лави та штреку на різних стадіях розвитку гірничих робіт з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей порід та параметрів структурної порушеності масиву. Проведено багатоваріантне моделювання стану дільничної виробки (штреку) в залежності від ширини та міцності елемента охорони виробки (ливої смуги з Бі-кріплення) для визначеного діапазону фізико-механічних властивостей порід. Встановлено, що при зменшенні параметру «відносна ширина ливої смуги» з максимального проектного значення 0,8 м до мінімального 0,6 м, де m – потужність вугільного пласта, сумарна втрата перерізу за висотою збільшується на 50 – 90 % залежно від міцності порід та матеріалу Бі-кріплення.

6) Розроблено методика багатфакторної структурної ідентифікації та узагальнення результатів обчислюваного експерименту на основі методу групового урахування аргументів (МГУА), яка дозволяє визначати найбільш домінуючі фактори та побудувати прогностичну математичну модель стійкості дільничної виробки при сполученні її з лавою, де вихідною функцією є вертикальна конвергенція порід. Встановлено, що вплив фактору «ширина ливої смуги» є найвагомим і складає 48 %. Фактори «потужність вугільного пласта», «міцність порід», «міцність ливої смуги» впливають на зменшення перерізу за висотою виробки на 25 %, 23 %, 4% відповідно. На цій основі розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів ливої смуги в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське».

7) Для умов вугільних шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» встановлені закономірності розвитку переміщень порід та формування зон непружних деформацій при послідовній зміні стану дільничної виробки під впливом виробленого простору двох

лав в умовах повторного використання штреку. Визначена роль елементів дворівневого кріплення (сталеполімерні та канатні анкери) та жорсткості охоронної конструкції в забезпеченні стійкості системи «лава - підготовча виробка - лава».

8) Показано, що за інших рівних умов, збільшення жорсткості контакту між елементами в охоронній конструкції дільничної виробки, дозволяє на 12-15% скоротити втрату площі її перерізу і збільшити шанси на повторне використання. Результати моделювання підтвердили, що з огляду на формування ринкових цін на матеріали, доцільно використовувати суцільну полосу з дерев'яних брусів (накатну смугу) як найбільш жорстку охоронну конструкцію в порівнянні з кострами та органічним кріпленням, а також підвищувати жорсткість цієї конструкції шляхом заповнення пустот піщано-цементною сумішшю.

9) З використанням методу групового урахування аргументів отримано залежність залишкової площі перерізу дільничної виробки, що перебуває під впливом вироблених просторів двох лав, від геологічних та технологічних параметрів, значущість яких обґрунтована комбінаторним та ітераційним алгоритмами МГУА, а саме від: ширини охоронного елемента, віднесеного до потужності пласта (w/m); кількості анкерів, віднесеної до площі перерізу виробки в проходці (N_a); кроку встановлення металевого аркового кріплення (q), коефіцієнту жорсткості контактів охоронного елемента (k_n); та параметру розробки ($\gamma H/\sigma$), в якому міцність породного масиву σ є стохастичною величиною, що обумовлена структурною порушеністю масиву. За ваговими коефіцієнтами встановлено вплив кожного фактору на результуючий показник, він становить: N_a – 32%, w/m – 28%, q – 18%, $\gamma H/\sigma$ – 13% та k_n – 9%.

10) Методом узагальненого приведенного градієнту розв'язано задачу нелінійної оптимізації та встановлено, що для досягнення умовного максимуму, тобто забезпечення збереження максимального перерізу підготовчої виробки, що перебуває під впливом двох лав, оптимальними параметрами для всіх значень $\gamma H/\sigma$ з інтервалу варіювання від 0,3 до 0,7 є: відносна кількість анкерів на площу перерізу виробки $N_a = 0,48$; відносна ширина охоронного елемента $w/m = 0,8$; інтервал встановлення металевого аркового кріплення $q = 0,5$ м; коефіцієнт жорсткості контактів охоронного елемента $k_n = 10000$ МПа/м. Така комбінація факторів дозволить зберегти до 68% площі перерізу дільничної виробки після сполучення з другою лавою. Результати досліджень були впроваджені в умовах 128-ї лави шахти «Ювілейна» в 2017 році, що призвело до збільшення середньодобового видобутку до рівня 2000 т/добу (+14%). Економічний ефект, що досягнутий в порівнянні з аналогічною 126-ю лавою, складає 66,9 млн. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Бабець Д.В. Геомеханічні явища при відпрацюванні кінцевих ділянок лав струговими комплексами: монографія / К.В. Кравченко, Д.В. Бабець. - Дніпро: НГУ, 2015, 108 с.
2. Бабець Д.В. Запас прочности монолитной бетонной крепи ствола / Янкін О.Е. *Совершенствование параметров буровзрывной технологии проведения*

вертикальных стволов для повышения устойчивости породных обнажений и крепи: монографія / О.Е. Янкін. - Дніпро: НГУ, 2016, 139 с.

Статті у періодичних фахових виданнях України:

3. Бабец Д.В. Методика прогноза смещений протяженной горной выработки на основе математического моделирования статистического разброса свойств вмещающих пород / Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В., Иванов А.С. *Вісник Криворізького технічного університету*. 2007. №16. С. 38-42.
4. Бабец Д.В. Оценка геомеханического состояния протяженных выработок с учетом стохастической изменчивости свойств горных пород / Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В. *Збірник наукових праць ДонНТУ «Проблеми гірського тиску»*. 2006. №14. С.144-156.
5. Babets D. Numerical modeling of rocks properties variation in some geomechanical problems / Sdvizkova E., Ruazantsev A., Babets D. *Науковий вісник НГУ*. 2006. №5. С.48-50.
6. Бабец Д.В. Численное моделирование вероятностного распределения свойств горных пород в задачах геомеханики / Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2007. №2(28). С. 402-407.
7. Babets D. Numerical modeling rocks properties random distribution in the geomechanical problems / Babets D., Kirichenko Ye, Sdvizhkova O. *Scientific bulletin of the National Mining University*. 2008. №6. С. 47-49.
8. Бабець Д.В. Оцінка геомеханічних процесів у породному масиві на основі ймовірно-статистичних моделей / Сдвижкова О.О., Бабець Д.В. *Уголь України*. 2009. №6. С. 38-42.
9. Бабец Д.В. Методика прогноза прочностных свойств углевмещающих пород в пределах шахтного поля / Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В., Мартовицкий А.В. *Збірник наукових праць НГУ*. 2010. №34 Том 1. С.47-55.
10. Бабець Д.В. Досвід застосування методу групового обліку аргументів для визначення НДС масиву при високих швидкостях посування очисного вибою / Дичковський Р.О. Бабець Д.В. Тимошенко Є.В. *Геотехнічна механіка*. 2011. № 94. С. 41-46.
11. Бабец Д.В. Анализ закономерностей формирования нагрузки на крепь при проектировании монтажных камер струговых лав в условиях шахт Западного Донбасса / Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В., Смирнов А.В. *Науковий вісник НГУ*. 2014. №5. С. 26-32 (Входить до н.-м. бази «Scopus»).
12. Бабец Д.В. Обоснование параметров крепления участковых выработок в условиях ГП "Шахтоуправление "Южнодонбасская №1" / Сдвижкова Е.А., Солодянкин А.В., Бабец Д.В., Машурка С.В., Кузьяева О.А. *Вісник Криворізького національного університету*. 2015. № 39. С.19-23.
13. Babets D.V. Determination of the displacements of rock mass nearby the dismantling chamber under effect of plow longwall / Sdvizhkova O.O., Babets D.V., Kravchenko K.V., Smirnov A.V. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. №2. P.34-42 (Входить до н.-м. бази «Scopus»).

14. Бабець Д.В. Развитие классификации горных пород по степени устойчивости с учетом их естественной нарушенности. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2016. № 2(97). С. 44-51 (Входит до н.-м. бази «Index copernicus»)
 15. Babets D.V. Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems / Babets D.V., O.O. Sdvyzhkova, M. H. Larionov, R. M. Tereshchuk *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. №2. P.58-64 (Входит до н.-м. бази «Scopus»).
 16. Бабець Д.В. Математическое моделирование влияния внешних факторов на запас прочности бетонной крепи вертикального ствола / Бабець Д.В., Солодянкин А.В., Янкин А.Е. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*. 2018. № 1(108). С. 65-72 (Входит до н.-м. бази «Index copernicus»).
 17. Babets D.V. Substantiation of rational roof-bolting parameters / Tereshchuk R.M., Khoziaikina N.V., Babets D.V. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. №1. P. 19-26 (Входит до н.-м. бази «Scopus»).
 18. Бабець Д.В. Численное моделирование влияния поверхности трещин при оценке прочности породного массива / Бабець Д.В., Сдвижкова Е.А., Сосна Д.О. *Вісник Криворізького національного університету*. 2018, № 47. С.169-175.
 19. Babets D. Implementation of probabilistic approach to rock mass strength estimation while excavating through fault zones / Babets D., Sdvyzhkova O., Shashenko O., Kravchenko K., Cabana E. *Min. miner. depos.* 2019. №13(4). P. 72-83 (Входит до н.-м. баз «Scopus» та «Web of Science»).
 20. Babets D.V. Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties / Babets D.V., Kovrov O. S., Moldabayev S. K., Tereschuk R. M., Sosna D. O. *Naukovyj Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. №4. P. 76-81 (Входит до н.-м. бази «Scopus»).
- Статті у закордонних виданнях:*
21. Babets D. Experimental studies of the Lvovsko-Volynskii rock post-failure behavior / Babets D., Ivanov O., Szuminski A., Klisowski R. *Scientific reports of resource issues - Frieberg: International university of resources*. 2010. Vol. 2. P. 65-70.
 22. Бабець Д.В. Методика прогноза смещений протяженной горной выработки с учетом статистического разброса свойств горных пород / Сдвижкова О.О., Бабець Д.В. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010. №1. С. 379-385.
 23. Babets D.V. Strength rock property forecast at conditions of mine "Komsomolets Donbassa" / Shashenko O.M., Babets D.V., Martovitsky A.V. *Scientific Reports on Resource Issues - Frieberg: International University of Resources*. 2012. Vol. 2. - P. 221 - 227.
 24. Babets D.V. Rock state assessment at initial stage of longwall mining in terms of poor rocks of Western Donbass / Sdvyzhkova O.O., Babets D.V., Kravchenko K.V., Smirnov A.V. *Theoretical and practical solutions of mineral resources mining - Leiden: CRC Press/Balkema*. 2015. P 65-70 (Входит до н.-м. бази «Scopus»).

25. Babets, D. Rock Mass Strength Estimation Using Structural Factor Based on Statistical Strength Theory. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 111-122 (Входить до н.-м. бази «**Scopus**»).
- Тези доповідей:*
26. Бабец Д.В. Исследование влияния неоднородности вмещающих пород на состояние протяженных выработок и разработка способов повышения их устойчивости / Сдвижкова Е.А., Тимченко С.Е., Бабец Д.В., Уланова Н.П. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2007»*. – Д.: НГУ, 2007 - С.41-44.
27. Babets D. Probabilistic approach to estimation of the rocks stability in affected area of coal-face works / Shashenko O., Sdvizhkova O., Babets D., Ivanov O. *MicroCAD 2008. International scientific conference “Construction and Operation of Underground Establishments”*. Miskolc, Hungary. 2008. P.57-62.
28. Бабец Д.В. Экспериментальное определение прочностных характеристик горных пород шахт Львовско-Волынского бассейна / Бабец Д.В., Иванов А.С. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2009»*. – Д.: НГУ, 2009 - С.31-36.
29. Babets D. Numerical modeling of rock property random distribution / Sdvizhkova O., Babets D. *5th colloquium “Rock Mechanics – theory and practice”*, Vienna, November 26-27, 2010, P. 127-134.
30. Бабец Д.В. Численное моделирование влияния скорости обнажения горных пород на механические процессы вблизи сопряжения очистной и подготовительной выработки / Иванов А.С., Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2009»*. – Д.: НГУ, 2009 - С.37-44.
31. Babets D.V. Method of argument group account in geomechanical calculation. / Shashenko O.M., Sdvizhkova O.O., Babets D.V. *12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010*, May 24-26, 2010, С. 488-493 (Входить до н.-м. бази «**Web of Science**»).
32. Бабець Д.В. Аналітичне визначення технологічних параметрів та напружень при високошвидкісному вийманні тонких вугільних пластів / Бабець Д.В., Тимошенко Є.В. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки»* (24-28 вересня 2012 р.). – Д.: НГУ, 2012. – С. 259-264 (Входить до н.-м. бази «**Web of Science**»).
33. Бабец Д.В. Оценка устойчивости предварительно пройденной демонтажной камеры при различных формах ее поперечного сечения в условиях ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» / Мартовицкий А.В., Пилюгин В.И., Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2012»*. – Д.: НГУ, 2012 - С.129-138.
34. Бабец Д.В. Применение метода группового учета аргументов для вероятностной оценки устойчивости подземных выработок / Бабец Д.В., Сдвижкова Е.А. *Шляхи сучасної математики: освіта, наука індустрія: матеріали конф.*, 18 квітня, м. Дніпропетровськ. – Д. НГУ, 2013. – С. 90-95.
35. Бабец Д.В. Обобщение результатов моделирования геомеханических процессов в породном массиве при монтаже и демонтаже струговых лав в условиях шахт Западного Донбасса с целью разработки типовых материалов проектирования

монтажных и демонтажных камер / Сдвижкова Е.А., Бабец Д.В., Смирнов А.В., Чередниченко Ю.Я. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2013»*. – Д.: НГУ, 2013 - С.257-264.

36. Бабец Д.В. Математическое моделирование напряженно деформированного состояния трещиноватого породного массива вокруг искусственной полости для различных состояний поверхностей ослабления / Бабец Д.В., Бабец В.В. *Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2017»*. – Д.: НГУ, 2017 - С. 213-218.
37. Babets D. Numerical simulation of jointed rock mass in geomechanical problems / Babets D., Sosna D. *«Енергоефективність та енергозбереження 2017»* Ministry of Educ. & Science of Ukraine, National Mining University. – Dnipro: NMU, 2017. – P. 27–29.
38. Babets, D. Mathematical modeling a stochastic variation of rock properties at an excavation design / Sdvyzhkova, O., Babets, D., Moldabayev, S., Rysbekov, K., Sarybayev, M. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2020, 2020-August (1.2)*, p. 165–172 (Входить до н.-м. бази «Scopus»).

Інші видання:

39. Бабець Д.В. Параметри ентропійної природи вугільних шахт щодо впливу на довкілля та виробничі витрати / Бардась А.В., Бабець Д.В. *Економічний вісник Національного гірничого університету*. 2009. №3. С. 88-96.

Внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві: [1, 2, 16] – розроблено методологію математичного моделювання геомеханічних процесів та виконано багатофакторний аналіз функціональної стійкості геомеханічних систем; [3–8, 15, 19, 22, 23, 27] – проаналізовано вплив стохастичної природи структурних елементів породного середовища на фізико-механічні властивості масиву гірських порід, що вміщує гірничі виробки та розроблено алгоритми щодо їх врахування в геомеханічних розрахунках; [10, 31, 32, 34, 39] – розробка методики побудови прогностичних моделей на основі алгоритмів структурної ідентифікації та виявлення найбільш впливових факторів базуючись на комбінаторних та ітераційних алгоритмах методу групового урахування аргументів; [18, 26, 29, 36, 38] – вдосконалення ймовірнісно-статистичної моделі структурно-неоднорідного породного середовища з урахуванням впливу як мікрорedefектів внутрішньої будови гірської породи, так і макроdefектів породного масиву у вигляді геологічних розривів та систем тріщин; [20, 21, 28] – лабораторні дослідження міцнісних та деформаційних властивостей осадових порід та статистична обробка результатів лабораторних досліджень; [9, 11-13, 17, 24, 30, 33, 35, 37] – математичне (чисельне) модулювання геомеханічних систем методом скінченних елементів та узагальнення результатів моделювання.

АНОТАЦІЯ

Бабець Д.В. Математичне моделювання геомеханічних процесів у техногенно порушеному середовищі зі стохастично розподіленими фізико-механічними властивостями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої наукової проблеми удосконалення прогнозу геомеханічних процесів в структурно та техногенно порушеному масиві на основі розвитку ймовірно-статистичних підходів та встановлення закономірностей зміни стану масиву на різних стадіях видобувних робіт з урахуванням стохастичної природи фізико-механічних властивостей середовища. Вдосконалено алгоритми врахування таких ознак порушеності породного масиву, як інтенсивність тріщинуватості, кут нахилу тріщин, стан контактів поверхні тріщин та обводненість порід. На основі тривимірного моделювання встановлено залежності переміщення контуру протяжної підземної виробки та висоти зони непружних деформацій в її околі від глибини розробки, міцності порід, інтенсивності тріщинуватості, індексу стану поверхні тріщин та відстані до вибою, на якій відбувається стабілізація переміщень. Розроблено методику багатофакторної структурної ідентифікації на основі методу групового урахування аргументів (МГУА), яка дозволила визначати найбільш домінуючі фактори та побудувати прогностичну модель стійкості дільничної виробки при сполученні її з лавою. Виконане геомеханічне обґрунтування повторного використання виїмкових виробок в умовах тріщинуватого масиву. Методом узагальненого приведення градієнту розв'язано задачу нелінійної оптимізації та встановлено оптимальну комбінацію факторів, що забезпечується збереження максимальної площі перерізу виробки.

Ключові слова: стійкість гірничих виробок, ймовірно-статистична модель, математичне моделювання, міцність породного масиву, повторне використання виробок, коефіцієнт структурного послаблення, метод скінченних елементів, прогностичні моделі

АННОТАЦИЯ

Бабец Д.В. Математическое моделирование геомеханических процессов в техногенно нарушенной среде со стохастически распределенными физико-механическими свойствами. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научной проблемы совершенствования прогноза поведения структурно и техногенно нарушенного массива на основе математического моделирования, развития вероятностно-статистических подходов и установлении закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния пород на разных стадиях горнодобывающих работ с учетом стохастической природы физико-механических свойств среды.

На основе лабораторных исследований микроструктуры образцов горных пород, разрушения образцов на гидравлическом прессе, натурного обследования трещиноватых пород в выработках установлена функция снижения прочностных и

деформационных свойств пород в зависимости от интенсивности трещин и состояния контактов трещин. В лабораторных условиях установлено влияние влажности на степень снижения прочности. На этой основе усовершенствованы вероятностно-статистические методы учета указанных характеристик структурно-нарушенного массива при численном моделировании состояния пород. На основе конечно-элементного 3D анализа получены закономерности влияния параметров трещиноватости на перемещения контура протяженной подземной выработки при различных значениях глубины разработки. В рамках теории прочности Хока-Брауна установлена функциональная зависимость показательного вида высоты зоны неупругих деформаций (ЗНД) вокруг выработки от глубины разработки, интенсивности трещин, введенного автором индекса состояния поверхности трещин и расстояния до проходческого забоя, на котором происходит стабилизация перемещений.

Выполнено многофакторное 3D моделирование состояния массива пород вокруг сопряжения подготовительной и очистной выработок при охране системы «лава-штрек» литой полосой из твердеющего материала «Би-крепь». Разработана методика структурной идентификации прогностической модели устойчивости выработки при ее сопряжении с лавой на основе метода группового учета аргументов (МГУА), которая позволила определить наиболее доминирующие факторы, среди которых влияние переменной «ширина литой полосы, отнесенная к мощности вынимаемого пласта», является наиболее значимым для сохранения допустимых размеров выработки.

Выполнено геомеханическое обоснование повторного использования выемочных штреков в условиях трещиноватого массива на основе усовершенствованной вероятностно-статистической модели прочности породного массива. Выявлена роль элементов двухуровневого анкерного крепления и жесткости элемента охраны при сохранении сечения повторно используемой выработки. Методом обобщенного приведенного градиента решена задача нелинейной оптимизации и установлено оптимальное сочетание факторов, при котором обеспечивается сохранение максимальной площади сечения участковой выработки после сопряжения со второй лавой. Оптимальными величинами для значений параметра разработки (отношения вертикальной составляющей начального поля напряжений к прочности породного массива) из интервала варьирования от 0,3 до 0,7 являются: количество анкеров, отнесенное к площади поперечного сечения выработки $N_a = 0,48$; ширина охранного элемента, отнесенная к мощности пласта $w/m = 0,8$; интервал установки металлического арочного крепления $q = 0,5$; коэффициент жесткости контактов между элементами охранной конструкции из деревянных брусьев с заполнением пустот цементно-песчаной смесью, $k_n = 10000$ МПа/м. Такая комбинация факторов позволит сохранить до 68% площади сечения участковой выработки после сопряжения со второй лавой.

Ключевые слова: устойчивость горных выработок, вероятностно-статистическая модель прочности, математическое моделирование, прочность породного массива, повторное использование выработок, коэффициент структурного ослабления, метод конечных элементов, прогностические модели.

ABSTRACT

Babets D.V. Mathematical modeling of geomechanical processes in a technogenic disturbed environment with stochastic physical and mechanical properties - Qualifying scientific work published as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.15.09 – "Geotechnics and Geomechanics". – National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to solving an important scientific problem of improving the forecast of geomechanical processes in structurally and technogenic disturbed rock mass based on the development of probabilistic and statistical approaches and establishing patterns of changes in the state of the rocks at different stages of mining, taking into account the stochastic nature of physical and mechanical properties. Algorithms for taking into account such patterns of rock mass disturbance as joint spacing, crack inclination angle, joint conditions, and rock water saturation has been improved. Based on three-dimensional modeling the dependences of the displacement of the contour of long underground excavation and the height of the zone of inelastic deformations in its vicinity on the depth of mining, rock strength, joint spacing, joint condition index, and distance to the face at which the movements are stabilized. A method of multifactor structural identification based on the group method of data handling (GMDH) was improved, which allowed to determine the most dominant factors and build a prognostic model of the stability of the preparatory excavation conjugated with longwall. The geomechanical substantiation of excavations reuse under conditions of the jointed mass is executed. The problem of nonlinear optimization is solved by the method of generalized reduced gradient and the optimal combination of factors is established, which ensures the preservation of the maximum cross-sectional area of preparatory excavation.

Key words: excavation stability, probabilistic-statistical model, mathematical modeling, rock mass strength, excavation reuse, structural factor, finite element method, predictive models

БАБЕЦЬ Дмитро Володимирович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У
ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗІ СТОХАСТИЧНО
РОЗПОДІЛЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

(Автореферат)

Здано на складання 18.08.2021р. Підписано до друку 18.08.2021р.

Формат 210x48. Папір офсетний. Друк цифровий.

Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 2,0.

Тираж 100 прим. Зам. № 1908

Видавництво ПП Вахмістров О.Є. Адреса
видавництва та друкарні: 49000, Дніпро, вул.
Пісаржевського, буд. 18. тел. +380633598309
ел. адреса: 8102@ukr.net

