

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

**СНІГУР Василь Григорович**



УДК 622.831.24:622.268.6

**НАУКОВІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ  
ІННОВАЦІЙНОГО КРІПЛЕННЯ ВИРОБОК, ЩО ПОВТОРНО  
ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ, З ГІРСЬКИМ МАСИВОМ ШАХТ  
ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ**

Спеціальність 05.15.02 – Підземна розробка родовищ корисних копалин

Реферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

### **Офіційні опоненти:**

чл.-кор. НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (м. Дніпро)

**Круковський  
Олександр  
Петрович**

доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (м. Луцьк)

**Подкопась  
Сергій  
Вікторович**

доктор технічних наук, доктор будівництва, дійсний член Академії будівництва України, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (м. Київ)

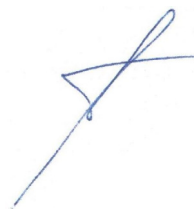
**Гайко  
Геннадій  
Іванович**

Захист відбудеться 29 травня 2024 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.03 із захисту дисертацій при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, Д. Яворницького, 19).

Реферат розісланий 26 квітня 2024 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.03  
кандидат технічних наук, доцент



**М.В. Петльований**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Незважаючи на інтенсивний розвиток способів і засобів для відновлюваних джерел енергії та використання альтернативної енергетики, динаміка зростання вуглеводобутку є позитивною як за основними вугледобувними країнами, так і в усьому світі загалом. У цій тенденції однією з нагальних проблем була і залишається на тривалу перспективу проблема підтримання гірничих виробок, особливо в зонах активного впливу очисних робіт.

Специфіка гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов відпрацювання пологих вугільних пластів в Україні (на підконтрольній території) підвищує актуальність даної проблеми з двох основних причин: необхідність швидкого відтворення потрібної протяжності виїмкових виробок у зв'язку з досягнутими високими темпами посування очисних вибоїв; надійне та ресурсозберігаюче підтримання цих виробок в умовах слабометаморфізованих порід. Перша проблема вирішується шляхом повторного використання виїмкових виробок. Успішне вирішення другої проблеми пов'язане з необхідністю широкомасштабного застосування інноваційних технічних заходів щодо використання комбінованих анкерних систем (поєднання сталеполімерних і канатних анкерів) у складі кріпильних конструкцій виїмкових виробок. Але недостатня вивченість закономірностей геомеханічних процесів управління гірським тиском, особливо в напрямі мінімізації інтенсивності його проявів при мінливих гірничо-геологічних умовах підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованому масиві, є головним фактором, який стримує широкомасштабне застосування інноваційних кріпильних конструкцій з комбінованими анкерними системами.

Тому є актуальною науковою проблемою розробка принципів і підходів до оптимізації режимів взаємодії гірського масиву слабометаморфізованих порід з інноваційними кріпильними конструкціями виїмкових виробок, що повторно використовуються, які базуються на закономірностях впливу їх деформаційно-силових характеристик на процес мінімізації параметрів проявів гірського тиску і дозволяють сформулювати єдину стратегію удосконалення кріпильних систем для підвищення надійності відпрацювання вугільних пластів в умовах Західного Донбасу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності зі «Стратегією розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року» (Вугільна промисловість), Програми «Українське вугілля» і планів держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України в 2017 – 2022 роках: тема ГП-474 «Розвиток наукових основ управління навантаженням кріпильних, охоронних систем повторно використовуваних виробок. Підвищення ефективності протипилового захисту» (№ держреєстрації 0115U002295), тема ГП-493 «Теоретичні та практичні основи управління нестійкими геомеханічними системами «масив – кріплення підземних виробок» (№ держреєстрації 0117U001131), тема ГП-501 «Виявлення закономірностей фазових перетворень газогідратів, напружено-деформованого стану гірського масиву і розробка інноваційних геотехнологій» (№ держреєстрації 0119U000249), тема ГП-504 «Наукові та практичні основи

оптимізації розрахунку параметрів інноваційних технологій при видобутку корисних копалин підземним способом» (№ держреєстрації 0120U102077), де автор був виконавцем.

**Мета роботи** – наукове обґрунтування принципів і методів ресурсозберігаючого підвищення стійкості виїмкових виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованому вуглевмісному масиві, на основі мінімізації інтенсивності проявів гірського тиску регульованими режимами роботи інноваційних кріпильних систем.

Поставлена мета реалізована вирішенням наступних основних завдань дослідження:

1. Розробка критеріїв мінімізації інтенсивності проявів гірського тиску та методики пошуку їх оптимальних параметрів.

2. Встановлення залежності зв'язку мінімізованих параметрів проявів гірського тиску з основними геомеханічними факторами підтримання виробки.

3. Формування уявлення про механізм взаємодії елементів інноваційних кріпильних конструкцій та розробка методики визначення їх деформаційно-силових характеристик.

4. Обґрунтування принципів адаптації режимів роботи інноваційних конструкцій під мінімізований характер проявів гірського тиску та розробка методики вибору їх раціональних параметрів для виїмкових виробок, що повторно використовуються в умовах слабометаморфізованих гірських порід.

5. Експериментальна перевірка принципів мінімізації інтенсивності проявів гірського тиску та оптимізації параметрів інноваційних кріпильних конструкцій.

6. Створення комплексу рекомендацій з ресурсозберігаючого підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються у вуглевмісному масиві слабометаморфізованих гірських порід.

*Ідея роботи* полягає у використанні закономірностей взаємовпливу параметрів зсуву вуглевмісного масиву слабометаморфізованих гірських порід та деформаційно-силових характеристик інноваційних кріпильних конструкцій для мінімізації інтенсивності проявів гірського тиску при ресурсозберігаючому вдосконаленні технології підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються.

*Об'єкт дослідження* – геомеханічні процеси взаємодії слабометаморфізованого вуглевмісного масиву з інноваційними кріпильними конструкціями, що включають комбіновані анкерні системи.

*Предмет дослідження* – закономірності взаємовпливу параметрів проявів гірського тиску та деформаційно-силових характеристик інноваційних кріпильних конструкцій виїмкових виробок, що повторно використовуються в умовах слабометаморфізованих гірських порід.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань у роботі був використаний комплекс методів: аналіз та узагальнення досліджень геомеханічних процесів навколо гірничих виробок у зонах активного впливу очисних робіт, режимів взаємодії гірських масивів з кріпильними конструкціями та методик їх оптимізації, досвіду застосування конструктивно-технологічних схем зміцнення приконтурних порід сталеполімерними та канатними анкерами у різних гірничо-геологічних умовах; аналітичні методи механіки гірських порід та

будівельної механіки шахтних досліджень та моніторинг стану виїмкових виробок, що повторно використовуються і підтримуються із застосуванням сталеполімерних анкерів та комбінованих анкерних систем.

#### **Наукові положення, що виносяться на захист:**

1. Оптимальні параметри деформаційно-силових характеристик кріпильних конструкцій виїмкових виробок, що повторно використовуються, знаходяться у ступеневому зв'язку з геомеханічним показником  $H/R$  відношення глибини  $H$  розміщення виробки до середнього розрахункового опору стиску  $R$  літотипів прилеглої масиви. Отримані закономірності дозволяють виробити універсальний підхід до мінімізації проявів гірського тиску за умови слабометаморфізованого масиву.

2. Закономірності оптимізації зв'язку навантаження  $P$  на кріплення з його піддатливістю  $u$  мають стабільні тенденції зростання за ступеневими залежностями від геомеханічного показника  $H/R$  у всіх трьох групах узагальнених текстур вуглевмісної товщі, які класифіковані за параметрами літологічних різниць, потужності та коефіцієнту міцності. Це дозволить використовувати єдиний механізм взаємодії армопородних розпирних конструкцій між собою, з рамним кріпленням і прилеглим масивом слабометаморфізованих порід при оптимізації деформаційно-силової характеристики інноваційного кріплення.

3. Деформаційно-силові характеристики інноваційних кріплень мають ступеневі залежності зв'язку з геомеханічним показником  $H/R$  і комбінацію ступеневих з показовими функціями по відношенню до розрахункового опору стиску  $R_{зак}$  заанкерованих порід з урахуванням складання вуглевмісного масиву і схем кріпильних конструкцій. Така сталість закономірностей впливу геомеханічних факторів обґрунтовує єдину стратегію ресурсозберігаючого вдосконалення кріпильних конструкцій з комбінованими анкерними системами.

4. Область доцільного застосування комбінованих анкерних систем визначається діапазонами змін геомеханічного показника  $H/R \geq 45 - 50$  м/МПа та розрахункового опору стиску  $R_{зак} \leq 14 - 20$  МПа. Це дозволить цілеспрямовано впроваджувати інноваційні кріпильні конструкції у тих гірничо-геологічних умовах, де вони забезпечують максимальний ефект підвищення стійкості гірничих виробок.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. **Вперше** розроблено алгоритм мінімізації параметрів проявів гірського тиску стосовно виїмкових виробок, що повторно використовуються і підтримуються в слабометаморфізованому вуглевмісному масиві порід незначної міцності.

2. **Обґрунтовано** нові методичні положення алгоритму пошуку оптимальних режимів взаємодії кріпильної конструкції та вуглепородного масиву, що відрізняються від відомих поєднанням багатоваріантних обчислювальних експериментів для розрахунку (методом скінченних елементів) деформаційно-силової характеристики масиву, що знеміцнюється, та вдосконаленої нормативної методики для визначення деформаційно-силової характеристики порід склепіння природної рівноваги.

3. **Вперше** встановлено закономірності зв'язку мінімальних параметрів проявів гірського тиску з геомеханічним показником  $H/R$  умов підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються, для основних груп текстур слабометаморфізованого масиву гірських порід.

4. **Запропоновано нову концепцію** механізму взаємодії розпірних конструкцій (комбіновані анкерні системи) між собою, з рамним кріпленням та прилеглим масивом, яка реалізована шляхом комбінації (при взаємному доповненні) багатоваріантних обчислювальних експериментів та аналітичних методів будівельної механіки.

5. **Вперше** встановлено закономірності зв'язку параметрів деформаційно-силової характеристики з геомеханічним показником  $H/R$  та розрахунковим опором стиску  $R_{зак}$  порід заанкереної покрівлі для трьох основних груп текстур вуглепородного масиву.

6. **Вперше** обґрунтовано область доцільного застосування комбінованих анкерних систем для підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються в умовах слабометаморфізованого вуглевмісного масиву.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується коректністю постановки та вирішення задач з використанням апробованих положень механіки гірських порід, будівельної механіки та методів математичної статистики; достатнім обсягом шахтних досліджень стану виїмкових виробок, що повторно використовуються при анкерному зміцненні приконтурного масиву, у тому числі комбінованими анкерними системами, задовільним ступенем відповідності результатів аналітичних досліджень та чисельного моделювання з експериментальними даними з відхиленнями в діапазоні від декількох відсотків до 20 – 30% для різних кріпильних конструкцій; позитивними результатами впровадження розроблених рекомендацій.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей зв'язку оптимальних режимів взаємодії вуглевмісного масиву і кріпильних конструкцій, що включають комбіновані анкерні системи, їх деформаційно-силових характеристик з геомеханічними факторами підтримання виїмкових виробок, які повторно використовуються в умовах слабометаморфізованих гірських порід малої міцності, що в сукупності сформували наукові основи для ресурсозберігаючого вдосконалення конструктивно-технологічних схем відпрацювання вугільних пластів у складних гірничо-геологічних умовах.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблено методику керування параметрами проявів гірського тиску, яка дозволяє мінімізувати їх інтенсивність залежно від геомеханічних факторів підтримання виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованому вуглевмісному масиві.

2. Створено узагальнюючу методику розрахунку деформаційно-силових характеристик серії кріпильних конструкцій, що включають сталеполімерні та канатні анкери.

3. Розроблено методику вибору раціональних кріпильних конструкцій з комбінованими анкерними системами.

4. Розроблено рекомендації з ресурсозберігаючого підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованих вуглевміщуючих породах.

5. Рекомендації впроваджено на шахті «Павлоградська» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (20 виробок). Отримано економічний ефект – 142,34 млн грн.

6. Рекомендації впроваджено на шахті ім. Героїв Космосу ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (8 виробок). Отримано економічний ефект – 54,85 млн грн.

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи протягом 2014 – 2024 рр. впроваджено на вугільних шахтах Західного Донбасу та у навчальному процесі, а саме: «Методика прогнозу небезпечних зон при сумісному відпрацюванні пластів вугілля Західного Донбасу» (2019 р.); «Методика керування параметрами проявів гірського тиску при повторному використанні виїмкових виробок на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (2020 р.); «Методика вибору раціональних кріпильних конструкцій з комбінованими анкерними системами для вугільних шахт України» (2023 р.); «Рекомендації з ресурсозберігаючого підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованих вуглевміщуючих породах» (2023 р.); навчальні програми підготовки бакалаврів і магістрів з дисциплін: «Механіка гірських порід», «Гірнична інженерія», «Моделювання геомеханічних систем у задачах підземного видобутку корисних копалин» у НТУ «Дніпровська політехніка» (2018 – 2023 рр.). Фактичний річний економічний ефект від впровадження наукових розробок становить 388,35 млн грн. Частина автора при використанні рекомендацій, науково-методичних і конструктивно-технологічних рішень становить 20% від загального економічного ефекту, тобто 77,67 млн грн.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні проблеми, мети, ідеї, завдань досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій щодо їх практичної реалізації; особисто проведено аналіз та узагальнення методів досліджень і досвіду застосування ресурсозберігаючих технологій зміцнення приконтурного масиву сталеполімерними та канатними анкерами для підвищення стійкості виїмкових виробок, що повторно використовуються і підтримуються у вуглевмісному масиві слабометаморфізованих гірських порід; обґрунтовано концепції шляхів оптимізації режимів взаємодії гірського масиву з кріпильними конструкціями, що включають комбіновані анкерні системи; отримані закономірності зв'язку оптимальних параметрів проявів гірського тиску, раціональних деформаційно-силових характеристик інноваційних кріпильних конструкцій з геомеханічними факторами умов відпрацювання вугільних пластів; розроблено методики управління параметрами проявів гірського тиску та вибору раціональних кріпильних конструкцій. Автор безпосередньо брав участь в експериментальних дослідженнях, апробації та впровадженні результатів роботи. Текст дисертації викладено автором особисто.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Українська школа гірничої інженерії» (Бердянськ, 2018 – 2022); Міжнародна наукова конференція «Школа експлуатації підземної» (Краків, 2018, 2019), III Міжнародна конференція «Вугільна промисловість України в умовах декарбонізації» (Дніпро, 2019); IV Міжнародна вугільна

конференція «Вугільні регіони України: справедлива трансформація і видобуток вугілля. Український міжнародний досвід» (Київ, 2021), XIV Міжнародна наукова конференція CHAOS-2021 (Афіни, 2021), а також на науково-технічних нарадах шахт ТОВ «ДТЕК Енерго».

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковані в 33 наукових працях, у тому числі: 2 колективні монографії (1 – англійською мовою у видавництві CRC Press/Balkema); 10 статей у періодичних виданнях, включених до переліку фахових наукових видань України; 4 статті у періодичних виданнях, що індексуються у базах даних Scopus і WoS (квартиль Q<sub>2</sub>) і прирівнюються до 12 публікацій; 13 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій, 4 публікації у інших виданнях.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 211 найменувань на 24 сторінках і 5 додатків на 20 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 356 сторінок, у тому числі 76 рисунків та 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Західний Донбас відіграє визначальну роль у вугледобувній промисловості України, де в даний час основним виробником є ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Для шахт цього регіону набуває дедалі більшої актуальності дві взаємопов'язані проблеми: необхідність швидкого відтворення необхідної протяжності виїмкових штреків у зв'язку з досягнутими високими темпами посування очисних вибоїв; ресурсозберігаючого підтримання цих виробок за умов слабометаморфізованих порід малої міцності з активною дією послаблюючих факторів.

Вирішенню обох проблем присвячено чимало досліджень провідних науковців: Булата А.Ф., Бондаренка В.І., Ковалевської І.А., Круковського О.П., Курносова С.А., Усаченка Б.М., Гайка Г.І., Симановича Г.А., Кузьменка О.М., Власова С.Ф., Подкопаєва С.В., Шашенка О.М., Сдвижкової О.О., Сахна І.Г., Гапеєва С.М., Дичковського Р.О., Солодянкіна О.В. та ін. Їх внесок у реалізацію цього напрямку створив базу для подальшого розвитку критично важливих етапів забезпечення енергетичної незалежності України маловитратними технологіями.

Перша зі сформульованих проблем вирішується шляхом повторного використання виїмкових штреків, але вони підтримуються на межі з виробленим простором в умовах дії високого гірського тиску. Тим не менш, до теперішнього часу загальний обсяг виробок, що повторно використовуються, сягає 77%. Друга проблема потребує застосування інноваційних технічних рішень щодо збереження стійкості виїмкових штреків, що повторно використовуються у дуже слабкому гірському масиві. При цьому такі технічні рішення мають реалізовуватися не на збиток собівартості кінцевої продукції.

Пошук виходу з цієї ситуації бачиться у широкомасштабному застосуванні так званих комбінованих анкерних систем, споруджуваних у поєднанні з рамним піддатливим кріпленням, що й почало практикуватися на шахтах Західного Донбасу. Оптимізаційні підходи стосовно аналізованих кріпильних систем підтримання виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованому масиві, розвиваються вперше, але успішне вирішення проблеми дасть вагомий



економічний, соціальний, екологічний та інші ефекти.

Переважну кількість сучасних досліджень спрямовано на пошук раціональних співвідношень між реакцією (несучою здатністю) кріплення та його піддатливістю. Якщо такі співвідношення розглядати у міру розвитку навантаження на кріплення, то очевидним є визначення – «деформаційно-силова характеристика» конструкції кріплення. У розумінні цього терміну робляться спроби оптимізації деформаційно-силової характеристики відповідно до конкретних умов підтримання виробок. По суті, стратегія успішного вирішення проблеми складається з двох основних напрямів:

– пошук закономірностей зв'язку процесу формування мінімально можливого навантаження на кріпильну конструкцію виїмкової виробки з геомеханічними факторами, що характеризують умови її підтримання;

– оптимізація параметрів інноваційних кріпильних систем за критеріями адаптації їх режиму роботи під виявлені закономірності формування мінімально можливої інтенсивності проявів гірського тиску, що відповідає принципам ресурсозбереження.

Реалізацію цих напрямів здійснено шляхом послідовного вирішення комплексу геомеханічних та науково-практичних завдань, об'єднаних у єдине ціле структурно-логічною схемою їхнього взаємозв'язку (рис. 1).

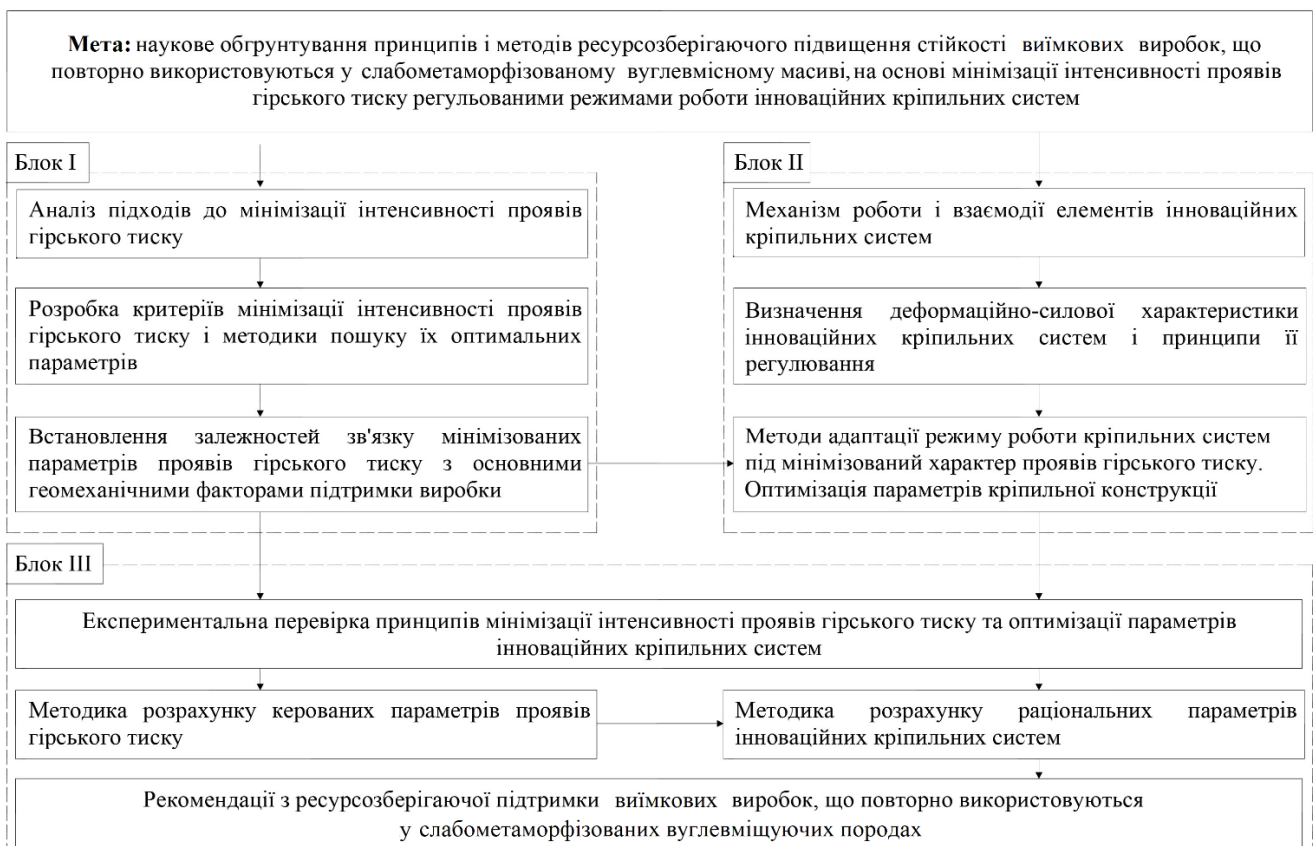
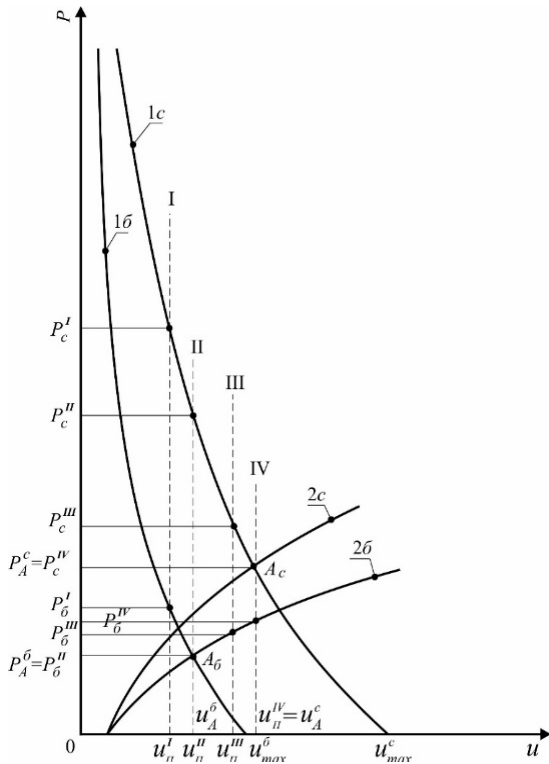


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема досліджень

Насамперед, розроблено серію якісних схем оптимізації режимів взаємодії вуглевмісного масиву з кріпильними конструкціями виїмкових штреків; на наступних етапах досліджень вони перетворюються на комплекс кількісних

закономірностей взаємозв'язку геомеханічних факторів і деформаційно-силових характеристик кріпильних елементів, які є базою для створення рекомендацій щодо ресурсозберігаючого вдосконалення схем підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються у масиві слабометаморфізованих гірських порід.



I, II, III і IV – допустима піддатливість кріпильної системи; 1б і 1с – деформаційно-силові характеристики масиву, що знеміцнюється, на контурі виробки в сприятливих (б) і складних (с) гірничо-геологічних умовах; 2б і 2с – деформаційно-силові характеристики порід склепіння природної рівноваги

Рисунок 2 – Схема пошуку раціональної деформаційно-силової характеристики кріпильної системи при зміні гірничо-геологічних умов підтримання виробки

знаходиться в рамках трьох основних тенденцій. Перша – при заляганні в основній покрівлі потужного та відносно міцного (як для умов Західного Донбасу) літотипу формується низьке навантаження при невеликих зміщеннях, що цілком закономірно: кріпильна система сприймає навантаження тільки від ваги порід безпосередньої покрівлі, а головній частині гірського тиску протидіє потужний і досить міцний шар основної покрівлі; в таких умовах доцільно застосування відносно жорсткої кріпильної конструкції помірної несучої здатності. Друга – у прилеглий основній покрівлі розміщено відносно міцний літотип середньої потужності: тут величини раціональної реакції та піддатливості кріпильної конструкції мають бути збільшені, а вирішення цього завдання доцільно

Геомеханічне обґрунтування напрямів оптимізації режимів взаємодії вуглевмісного масиву з кріпильною системою виїмкової виробки дозволило виділити низку основних впливових факторів на формування класичних тенденцій її навантаження (рис. 2): крім глибини розміщення виробки та механічних властивостей прилеглих літотипів такими є текстура масиву, ступінь його порушеності та обводненості, а також узгодженості режимів роботи кріпильних елементів між собою. Оцінка принципів оптимізації деформаційно-силової характеристики  $P(u)$  кріпильної конструкції (тут  $P$  – її реакція,  $u$  – піддатливість) при суттєвій зміні гірничо-геологічних умов підтримання виїмкової виробки (від умовно «сприятливих» до умовно «складних») обґрунтовує висновок про перевагу збільшення піддатливості  $u$  для зниження навантаження  $P$  у складних умовах. Але збільшення піддатливості має чітку межу: вона не повинна перевищувати оптимальної величини  $u_A^c$  балансу деформаційно-силових характеристик масиву, що знеміцнюється  $P_1(u)$ , і порід склепіння природної рівноваги  $P_2(u)$  для найбільш складних умов.

Вплив текстури масиву на варіацію раціональної деформаційно-силової характеристики системи кріплення

здійснювати за допомогою комбінованих анкерних систем. Третя тенденція – при переважно тонкошаруватому складанні основної покрівлі оптимізація деформаційно-силової характеристики кріпильної системи доставляє найбільші значення раціональної реакції її опору за досить високої піддатливості.

Важливе значення має місце розташування літотипу підвищеної стійкості відносно склепіння виробки; в деякому діапазоні варіації геомеханічних факторів збереження його цілісності забезпечує зниження навантаження на кріпильну систему. В цілому, використання особливостей текстури порід основної покрівлі для мінімізації навантаження на кріпильну систему має широку перспективу щодо зміцнення порід комбінацією різних типів анкерів.

Узгодження режимів роботи кріпильних елементів має здійснюватися у напрямі мінімізації навантаження на кріпильну систему в цілому, а для окремих її елементів найважливіше виконання умови рівномірності (сприйняття ними навантажень, пропорційних своїй несучій здатності), що відображає критерій досягнення максимуму опору кріпильної системи в цілому. Підвищення рівня рівномірності кожного з кріпильних елементів, що сполучаються, нерозривно пов'язано зі ступенем узгодженості їх деформаційно-силових характеристик, що замикає коло взаємовпливу та взаємозв'язку основних позицій геомеханічної проблеми, яка розглядається.

Для переходу від загальної якісної картини до кількісних оцінок розроблено алгоритм пошуку раціональних режимів взаємодії, який включає виконання низки досліджень, що тісно пов'язані між собою. По-перше, основою для оптимізації режиму роботи кріпильної системи є деформаційно-силові характеристики масиву, що знеміцнюється  $P_1(u)$ , та порід склепіння природної рівноваги  $P_2(u)$ . Без їх встановлення у конкретних гірничо-геологічних умовах неможливо визначити як точки  $A$  (див. рис. 2) оптимального поєднання реакції  $P_A$  кріпильної системи та її податливості  $u_A$ , так і саму раціональну деформаційно-силову характеристику  $P(u)$  наростання опору кріпильної системи від моменту її зведення до сталого режиму роботи. По-друге, необхідно визначити деформаційно-силову характеристику кріпильної системи  $P(u)$ , що застосовується. Це є складним завданням розрахунку конструкції в цілому і кожного основного кріпильного елемента з урахуванням їх силової взаємодії між собою. На основі такого міцнісного розрахунку, змінюючи параметри кріпильної системи, підбираємо їх таким чином, щоб деформаційно-силова характеристика  $P(u)$  кріпильної системи в цілому відповідала раціональній функції, визначеній на попередньому етапі. По-третє, при підборі раціональної деформаційно-силової характеристики  $P(u)$  слід враховувати умову рівномірності, виконання якої накладає свої обмеження на діапазон зміни та дискретні значення низки параметрів кріпильної системи.

Перелічені три етапи, виконувані частково спільно, дуже складні у конкретній реалізації. Для спрощення завдань, що розглядаються, не обійтися без низки схематичних уявлень, а це, у свою чергу, призведе до відомих похибок у розрахунках та підсумкових рекомендаціях. Для уникнення цього недоліку спільно використані: комплекс багатоваріантних обчислювальних експериментів, оснований на широко апробованому методі скінченних елементів (МСЕ),

експериментально-аналітична методика прогнозу проявів гірського тиску, що викладена в існуючих нормативних документах, і групування найбільш характерних для Західного Донбасу текстур надвугільної товщі.

Підсумовуючи методичні аспекти, алгоритм пошуку раціональних параметрів кріпильної системи включає такі позиції: взаємодія деформаційно-силових характеристик породного масиву, що знеміцнюється, і кріпильної системи досліджується за допомогою МСЕ у пружно-пластичній постановці; пошук раціонального рівноважного стану здійснюється на основі спільного розгляду деформаційно-силової характеристики масиву, що знеміцнюється  $P_1(u)$ , яка визначається МСЕ, та деформаційно-силової характеристики порід склепіння природної рівноваги  $P_2(u)$ , яка визначається за нормативною методикою; оптимізація деформаційно-силової характеристики кріпильної системи виконується на основі розрахунків МСЕ з урахуванням функції  $P_2(u)$ ; оптимізація параметрів елементів кріпильної системи з урахуванням їх рівномірності виконується на базі досліджень їх напружено-деформованого стану (НДС) з використанням МСЕ.

При визначенні деформаційно-силової характеристики масиву, що знеміцнюється  $P_1(u)$ , здійснено наступну послідовність дій: моделюється конкретний тип узагальненої текстури з механічними характеристиками літотипів вуглевмісного масиву при фіксованих параметрах кріпильної системи виїмкової виробки (подоба «еталонної» конструкції); діапазон зміни глибини розробки  $H$  у Західному Донбасі від 200 м до 600 м повністю охоплює реальні умови ведення гірничих робіт; за нормативною методикою обчислюється середній розрахунковий опір стиску  $R$  прилеглої вуглевмісної товщі; приймається кілька значень (не менше п'яти) показника  $H/R$  у досліджуваному діапазоні  $200 \leq H \leq 600$  м; варіація зміщень  $u_j$  контуру виробки (в діапазоні 300 – 1100 мм) забезпечується моделюванням у покрівлі додаткового «віртуального» шару змінної жорсткості; для кожного значення  $u_j$  визначається величина навантаження  $P_j$  як сума вертикальних напружень  $\sigma_y$ , розподілених по контуру виїмкової виробки одиничної довжини; для кожного зафіксованого значення  $H/R$  проводиться кілька (не менше п'яти) розрахунків НДС при різній величині  $u_j$  і будується сім'я ліній, що відображає деформаційно-силову характеристику масиву, що знеміцнюється  $P_1(u)$ .

У підсумку, для конкретного типу узагальненої текстури вуглевмісного масиву (при «еталонній» кріпильній системі) отримано набір графіків за різних значень  $H/R$ , що значно скорочує обчислювальні і часові ресурси, які необхідні для отримання закономірностей зв'язку функції  $P_1(u)$  з показником  $H/R$ .

Інший геомеханічний фактор, який має суттєвий вплив, це текстура прилеглої вуглевмісної товщі, яка хоч і відрізняється достатньою різноманітністю, але цю варіацію можна систематизувати і згрупувати в деякі узагальнені типи згідно з наявними дослідженнями для Західного Донбасу:

– група I – найбільш несприятливі (складні) умови підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються, – характеризується «...переважно тонкошаруватою текстурою слабких порід ( $f < 1,5$ ); шари аргіліту та алевроліту потужністю понад 1,0 м із середньою відстанню між поверхнями послаблення до 1,0 м; шари аргіліту та алевроліту ( $f = 1,5 - 2,5$ ) середньої потужності, періодично розділені обводненими вугільними прошарками потужністю 0,1 – 0,3 м»;

– група II – умови середньої інтенсивності проявів гірського тиску, – характеризується «...тонко- та середньшаруватою текстурою необводнених порід з коефіцієнтом міцності аргіліту та алевроліту  $f = 1,5 - 2,5$ ; середньо- та крупношаруватою текстурою обводнених порід ( $f > 1,5$ ) при заляганні пісковика потужністю до 3,0 м»;

– група III – сприятливі умови для повторного використання виїмкових виробок, характеризується «...середньо- та крупношаруватою текстурою обводнених порід ( $f > 2,5$ ) при заляганні пісковика потужністю більше 3,0 м; середньо- та крупношаруватою текстурою необводнених порід ( $f > 2,5$ )».

За зазначеними трьома групами текстур прилеглого масиву проведено окремі серії обчислювальних експериментів і в результаті отримано три сім'ї графіків, що відображають деформаційно-силову характеристику  $P_1(u)$  масиву, що знеміцнюється.

Для визначення другої складової оптимізаційної схеми – деформаційно-силової характеристики  $P_2(u)$  порід склепіння природної рівноваги використано співвідношення нормативної методики (СОУ 10.1.00185790.011:2007) з значними перетвореннями та спрощеннями, пов'язаними з конкретизацією регіону (Західний Донбас), схем кріплення та охорони виїмкових виробок на найбільш актуальній ділянці їх підтримання – зоні стабілізації гірського тиску позаду лави. Встановлено лінійну функцію  $P_2(u)$  виду

$$P_2(u) = K_d B \gamma \frac{(1 - \alpha_1)^2 \left(1 - \frac{K_p}{100}\right)}{0,15 + 0,03\alpha_2 - 0,18\alpha_1} u, \quad (1)$$

де  $K_d$  – коефіцієнт динамічності; визначається згідно з рекомендаціями СОУ-2007;  $B$  – ширина виробки у проходці;  $\gamma$  – середньозважена об'ємна вага порід у склепінні природної рівноваги;  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – параметри, що встановлюють співвідношення між опусканнями покрівлі виробки на ділянках: поза зоною впливу очисних робіт, у зоні фронтального опорного тиску лави, що наближається, позаду очисного вибою в зоні стабілізації проявів гірського тиску;  $K_p$  – коефіцієнт впливу реакції кріпильної системи на обмеження опускання порід покрівлі виїмкової виробки; визначається за табл. 1.

Параметри  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  отримано на основі розрахункових виразів нормативного документу (СОУ-2007) шляхом їх перетворення під задачу визначення функції  $P_2(u)$ :

$$\alpha_1 = \frac{1,5R_1^{\text{II}}(R_3^K + R_3^{\text{II}})}{(3,0 + 2m)R_3^{\text{II}}(R_1^K + R_1^{\text{II}})}; \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \frac{3,9R_2^{\text{II}}(R_3^K + R_3^{\text{II}})}{(3,9 + 2m)R_3^{\text{II}}(R_2^K + R_2^{\text{II}})}; \quad (3)$$

де  $m$  – виїмкова потужність вугільного пласта;  $R_{1,2,3}^{K,II}$  – розрахункові значення опору стиску порід покрівлі (індекс « $K$ ») і підшви (індекс « $II$ ») вугільного пласта на відповідних ділянках виїмкової виробки: 1 – поза зоною впливу очисних робіт; 2 – у зоні фронтального опорного тиску; 3 – позаду лави; визначається за методикою СОУ-2007.

При визначенні  $P_2(u)$  прийняті нами за основу методичні положення нормативного документу СОУ-2007 доповнено врахуванням такого геомеханічного явища як обмеження розмірів склепіння за рахунок реакції  $P$  кріпильної системи.

Для цього запроваджено відповідний коефіцієнт  $K_p$ , отриманий на основі аналізу існуючих досліджень. Також враховано, що коефіцієнт  $K_p$  залежить від середньозваженого опору стиску  $R_{св}$  порід (у порушеному стані), де розташовується склепіння природної рівноваги; ці дані зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта  $K_p$  впливу реакції кріпильної системи, %

Середньозважений опір стиску порід склепіння $R_{св}$ , МПа	Реакція кріпильної системи $P$ , кПа					
	50	100	150	200	250	300
5	4,2	9,6	15,6	22,1	28,8	35,9
10	3,0	6,8	11,1	15,6	20,4	25,4
15	2,5	5,6	9,1	12,9	16,8	20,9
20	2,1	4,8	7,8	11,0	14,4	18,0
30	1,7	3,9	6,4	9,0	11,7	14,6
40	1,5	3,4	5,5	7,8	10,2	12,7

Функції деформаційно-силових характеристик  $P_1(u)$  і  $P_2(u)$  є ключовими позиціями при оптимізації режимів роботи кріпильної системи виїмкових виробок. Пошук оптимальної точки  $A$  (див. рис. 2) деформаційно-силової характеристики здійснюється шляхом побудови двох графіків, що відображають функції  $P_1(u)$  і  $P_2(u)$ , та знаходження точки їх перетину. Координати  $P_A$  і  $u_A$  точки  $A$  – це одиничний розрахунок при конкретному значенні показника  $H/R$  для будови прилеглого масиву, що відповідає одній із його типових текстур. Для встановлення закономірностей зв'язку оптимальних значень  $P_A$  і  $u_A$  з геомеханічними факторами підтримання виїмкових виробок на шахтах Західного Донбасу здійснено комплекс розрахунків для всіх трьох груп текстур прилеглого

вуглевмісного масиву при варіації показника  $H/R$  (рис. 3).

Отримані дані обробляються методами кореляційно-дисперсійного аналізу і кінцевим результатом є функції  $P_A(H/R)$  і  $u_A(H/R)$  для трьох груп узагальнених текстур надвугільної товщі Західного району Донбасу (коефіцієнт кореляції  $r=0,8$ ).

$$\text{Група I } P_A = 284(H/R)^{0,21}, \text{ кН/м;} \quad (4)$$

$$u_A = 321(H/R)^{0,21}, \text{ мм.} \quad (5)$$

$$\text{Група II } P_A = 270(H/R)^{0,18}, \text{ кН/м;} \quad (6)$$

$$u_A = 172(H/R)^{0,32}, \text{ мм.} \quad (7)$$

$$\text{Група III } P_A = 260(H/R)^{0,15}, \text{ кН/м;} \quad (8)$$

$$u_A = 104(H/R)^{0,38}, \text{ мм.} \quad (9)$$

Розроблена методика дозволяє визначити умови формування мінімального навантаження на кріплення, під які проводиться оптимізація деформаційно-силової характеристики кріпильної системи.

Умова пошуку раціональних режимів взаємодії кріплення з породним масивом формулюється так: реакція кріплення  $P$  повинна бути не менше величин навантажень  $P_1(u)$  і  $P_2(u)$  на всьому діапазоні її піддатливості  $0 \leq u \leq u_A$ ; максимальна реакція  $P_{\max}$  (несуча здатність) кріпильної системи визначається за виразом

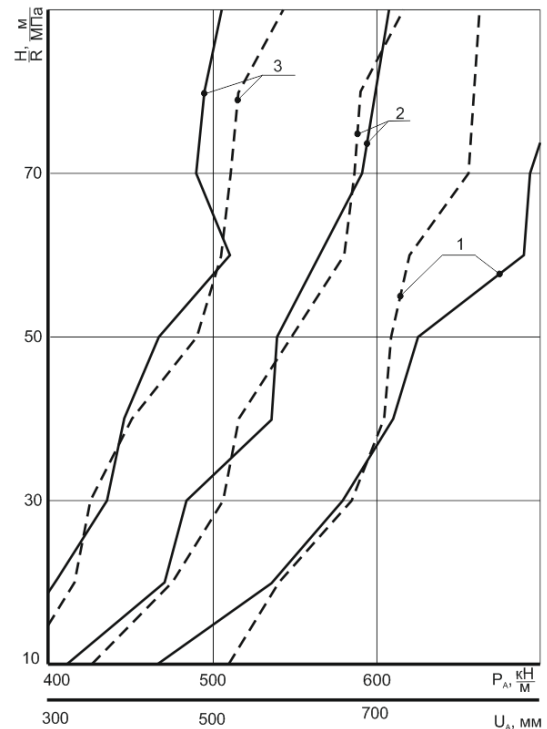
$$P_{\max} = K_{\text{зан}} P_A, \quad (10)$$

а максимальна піддатливість  $u_{\max}$  – за формулою

$$u_{\max} = u_A, \quad (11)$$

де  $K_{\text{зан}} = 1,15 - 1,20$  – коефіцієнт запасу, що враховує вплив різного роду факторів, які слабо прогножуються.

Перевірка на адекватність і достовірність оптимізаційних рішень виконана на серії тестових розрахунків у два етапи: перший – оцінює адекватність нового прийому в технології проведення обчислювального експерименту з розрахунку деформаційно-силової характеристики гірського масиву, що знеміцнюється (навколо підземної виробки); другий – покликаний проаналізувати ступінь достовірності результатів розрахунку за методикою оптимізації в цілому по відношенню до існуючих методичних розробок, покладених в основу відповідних



1 – група I; 2 – група II; 3 – група III

Рисунок 3 – Закономірності зв'язку оптимальних параметрів реакції  $P_A$  (—) і піддатливості  $u_A$  (---) кріпильної системи залежно від показника  $H/R$  гірничо-геологічних умов і типу текстури надвугільної товщі

нормативних документів.

Перший етап тестування стосується оцінки адекватності визначення функції  $q_1(u)$  або  $P_1(u)$  та реалізований шляхом порівняння таких для запропонованого прийому введення у безпосередню покрівлю імітатора породного шару, що легко деформується (з регульованими деформаційними властивостями), у ході вирішення пружно-пластичної задачі з «суворим» розрахунком моделі за повною діаграмою деформування порід з відображенням ділянок знеміцнення і розпушення (рис. 4). У якісному плані функції  $P_1(u)$  або  $q_1(u)$  дуже схожі одна з одною, а в кількісному – спостерігаються відхилення різних знаків у діапазоні від -12,0% до +24,1%, що може бути визнано цілком задовільним результатом.

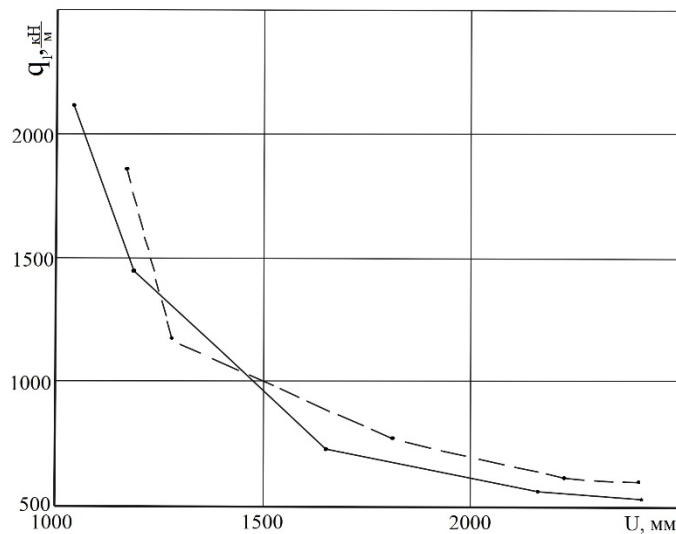


Рисунок 4 – До аналізу адекватності методики (----) визначення деформаційно-силової характеристики  $q_1(u)$  масиву, що знеміцнюється, при порівнянні з фізичною моделлю (—) повної діаграми деформування матеріалів елементів геомеханічної системи

Для оцінки ступеня достовірності розробленої методики оптимізації проведено порівняння результатів з нормативними методиками (рис. 5) для двох геомеханічних ситуацій: умовно «сприятливих» (індекс «б») та умовно «складних» (індекс «с»). У нормативних методиках не вирішується завдання оптимізації (діапазон зміни функції  $P(u)$  показаний пунктирними лініями та заштрихований), але за результатами порівняння можна зробити два висновки: по-перше, розроблена оптимізаційна схема дає суттєвий ефект зниження навантаження на кріпильну систему (36,9 – 57,5% для сприятливих та 10,8 – 27,5% для складних умов); по-друге, за неоптимальних режимів взаємодії кріплення та породного масиву відмінності з нормативними документами у результатах розрахунків навантаження скорочуються до цілком прийнятних значень (3,7 – 19,4% у сприятливих та 1,7 – 18,0% у складних умовах).

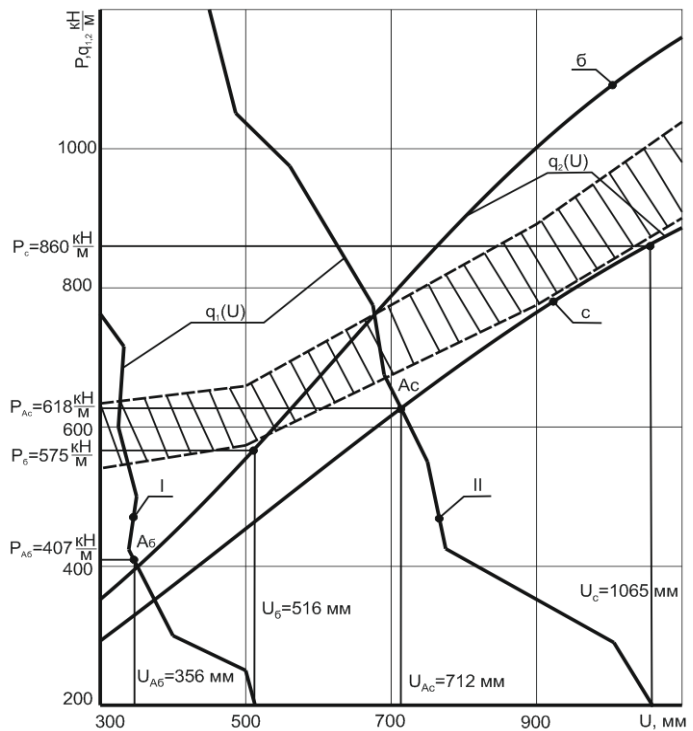
Кріпильні системи виїмкових виробок, що повторно використовуються, включають кілька вантажонесучих елементів, основними з яких є: рамне піддатливе кріплення, опорно-анкерне кріплення у складі сталеполімерних анкерів,



актуальне використання канатних анкерів глибокого закладання, центральних і бокових стояків кріплення посилення. Усі перелічені кріпильні елементи вимагають узгодження між собою режимів роботи, щоб сумарна їхня дія відповідала раціональній деформаційно-силовій характеристиці кріпильної системи в цілому.

Найбільш складним завданням є визначення деформаційно-силової характеристики армопородної конструкції, що формується в покрівлі та боках виробки за допомогою комбінованої анкерної системи. Її рішення реалізовано на принципах взаємного доповнення результатів досліджень з використанням обчислювального експерименту та аналітичних методів розрахунку вантажонесучих конструкцій, а сполучною ланкою є розробка механізму деформування зміцнених порід, як таких, та при їх взаємодії з іншими кріпильними елементами. Обчислювальний експеримент дає основу для більш об'єктивної та обґрунтованої побудови розрахункових схем аналітичних методів визначення деформаційно-силової характеристики армопородної конструкції, а ті, у свою чергу, удосконалюють граничні умови та моделі поведінки елементів як усередині армопородної конструкції, так і особливості зовнішнього на неї впливу.

Систематизовано та розкрито комплекс підпорядкованих завдань: механізм зрушення надвугільної товщі навколо виїмкових виробок у періоди підходу та відходу очисного вибою; механізм навантаження кріпильних та охоронних систем виїмкових виробок; механізм анкерного зміцнення приконтурного масиву; механізм деформування армопородних конструкцій, сформованих комбінованими анкерними системами; механізм взаємодії елементів рамно-анкерних кріплень. Кожне з перелічених підзавдань розкриває певний спектр питань, які є складовими частинами опису загального механізму взаємодії анкерів і рам при підтримці виїмкових виробок, що повторно використовуються.



I –  $H/R = 9,6$  м/МПа; II –  $H/R = 88,9$  м/МПа;  
«б» –  $B = 5,18$  м,  $R_{cv} = 30,2$  МПа;  
«с» –  $B = 4,50$  м,  $R_{cv} = 5,3$  МПа

Рисунок 5 – До аналізу достовірності та адекватності методики оптимізації режимів взаємодії кріпильної системи з прилеглим масивом: - - - межі діапазону навантажень на піддатливе кріплення за нормативними документами

Відомі схематичні уявлення про процеси зрушення надвугільної товщі та перетворення її текстури поблизу виїмкової виробки після проходу очисного вибою (рис. 6) скориговані

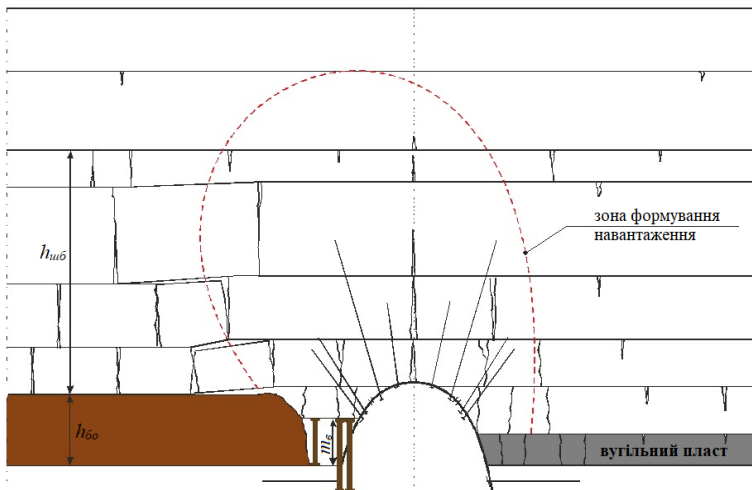


Рисунок 6 – Схема перетворення текстури надвугільної товщі навколо виїмкової виробки

врахуванням комбінованих анкерних систем. У кожному шарі основної покрівлі виникає подоба розпірних конструкцій (систем) із взаємодіючих один з одним породних блоків, а величина навантаження залежить від того, яка частина розпірних систем зберегла стійкість, а яка ні.

Основною складовою взаємодії є поведінка зміцнених анкерами прилеглих порід, яка головним чином залежить від

двох складових: текстури і властивостей вуглевмісного масиву; параметрів встановлення комбінованої анкерної системи. Тому необхідним є використання поєднання аналізу результатів розрахунку НДС за допомогою МСЕ та складання ідеалізованих схем деформування армопородних конструкцій. Зіставляючи найбільш уживані довжини канатних анкерів з текстурою прилеглих порід надвугільної товщі визначено, що найбільш всеосяжним варіантом є зміцнення до трьох породних шарів покрівлі. Цей варіант наведено на схемі рис. 6 і для його більш детального розгляду на рис. 7 побудовано центральну частину схеми з розподілом навантажень і зусиль від взаємодіючих елементів.

Комбінована анкерна система формує вантажонесучу армопородну конструкцію, що складається з трьох породних шарів (№1, №2 і №3), розбитих на блоки. У кожному з трьох породних шарів виникає розпірна система, що взаємодіє як з іншими розпірними системами, так і з рамним кріпленням безпосередньо або опосередковано через інші породні шари. Центральна частина розпірних систем виділена тому, що саме тут відбувається основна силова

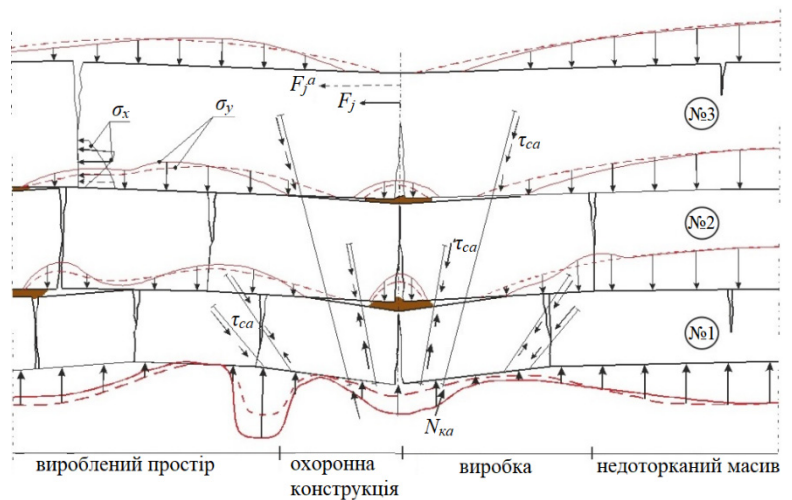
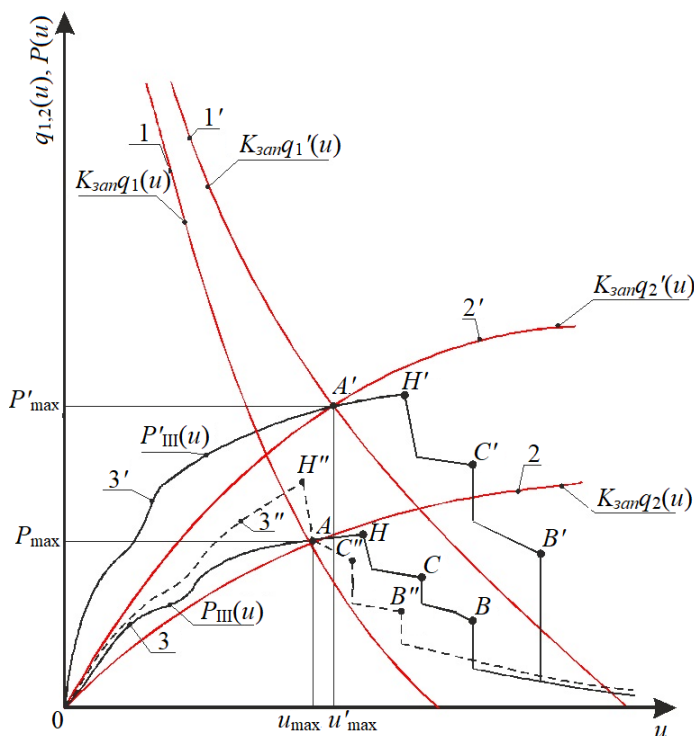


Рисунок 7 – Схема навантаження армопородної конструкції з трьох розпірних систем

взаємодія з рамним кріпленням та їх охоронною конструкцією. На кожен розпірну систему діє вертикальний тиск від верхніх породних шарів і реакція опору від нижніх шарів або рамного кріплення у поєднанні з охоронною

конструкцією. Ці зусилля представлені у вигляді вертикальних напружень  $\sigma_y$ ; особливості їх розподілу обумовлені деформаціями породних блоків. У горизонтальному напрямку на кожен породний блок діють напруження  $\sigma_x$  і їх результуюче зусилля  $F_j$ ; обидва види навантаження залежать від ступеня знеміцнення порід у зоні концентрацій стискних  $\sigma_x$  та інтенсивності напружень  $\sigma$  в цілому.

Комбінована анкерна система підвищує стійкість породних блоків: їхній взаємний поворот обмежується, ступінь знеміцнення у квазіпластичних шарнірах знижується і епора  $\sigma_x$  (пунктирна лінія) перетворюється порівняно з варіантом відсутності анкерного зміцнення (суцільна лінія на рис. 7). При цьому збільшуються результуючі зусилля  $F_j^a$  з одночасним ростом плеча їх дії, що призводить до підвищення стійкості розпірної системи.



1 і 1' – деформаційно-силові характеристики масиву, що знеміцнюється; 2 і 2' – деформаційно-силові характеристики склепіння природної рівноваги; 3, 3' і 3'' – деформаційно-силові характеристики кріпильної системи

Рисунок 8 – Схема оптимізації режимів роботи рамного кріплення й армопородної конструкції, сформованої комбінованою анкерною системою

рис. 8. Лінії 1 і 1' відображають деформаційно-силові характеристики масиву, що знеміцнюється, для двох геомеханічних ситуацій: помірного  $K_{zan}P_1(u)$  та інтенсивного  $K_{zan}P'_1(u)$  проявів гірського тиску. Лініями 2 і 2' показано два варіанти деформаційно-силової характеристики  $K_{zan}P_2(u)$  і  $K_{zan}P'_2(u)$  порід склепіння природної рівноваги. Точками A і A' відзначені перетини попарно ліній

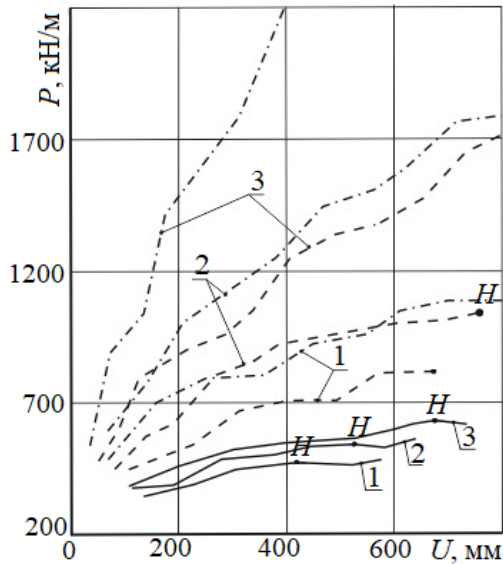
Вплив сталеполімерних анкерів, що закріплюються по всій їх довжині, виражається у появі дотичних напружень  $\tau_{ca}$  на контакті з породними стінками шпура. Канатні анкери закріплюються лише у своїй замковій часті протяжністю 1,0 – 1,1 м, але на решті довжині немає контакту з породними стінками шпура. Тому їх силовий вплив полягає у розподілі дотичних напружень  $\tau_{ка}$  у межах замкової частини, які врівноважуються зосередженими зусиллями  $N_{ка}$  від опорної плити на хвостовику анкера.

За наведеною розрахунковою схемою оцінено рівноважний стан центральних блоків кожної з трьох розпірних систем щодо зміни їх деформаційно-силових характеристик у процесі розвитку зрушень надвугільної товщі. Для ілюстрації розроблених уявлень побудовано схему оптимізації, показано на

$l$  і  $2$ , а також  $l'$  та  $2'$ , які відображають раціональні параметри: реакція  $P_{\max}$ ,  $P'_{\max}$  кріпильної системи в цілому та її піддатливість  $u_{\max}$ ,  $u'_{\max}$ . Загальна деформаційно-силова характеристика кріпильної системи в цілому показана лініями  $3$ ,  $3'$  та  $3''$ . На стадії стійкого стану (до точок  $H$  і  $H'$  поетапного руйнування розпірно-блокових конструкцій) деформаційно-силова характеристика кріпильної системи цілком відповідає оптимізаційним критеріям. На стадії поетапної втрати стійкості розпірно-блокових конструкцій (від нижньої до верхньої) оптимізаційні рішення є неможливими. Тому параметри кріпильної системи в цілому повинні підбиратися таким чином, щоб її деформаційно-силова характеристика проходила через точку  $A$  до початку розвитку поетапного обвалення розпірно-блокових конструкцій. Тоді є деякий резерв (опору та піддатливості) у кріпильній системі, який забезпечить (ділянки  $AH$ ,  $A'H'$ ) її стійкість при виникненні слабко прогнозованої активізації гірського тиску.

Відомі складнощі визначення деформаційно-силової характеристики кріпильної конструкції в цілому подолані за рахунок поєднання обчислювального експерименту (МСЕ) з аналітичними методами будівельної механіки. Алгоритм реалізації запропонованої методики полягає в наступному: інформація, що отримується з результатів обчислювальних експериментів, використовується при побудові схем навантаження кожної з трьох розпірно-блокових конструкцій та армопородної плити в цілому; допустимий діапазон опору армопородної плити визначається за граничним станом нижньої розпірно-блокової конструкції; методами будівельної механіки розраховується кожна розпірно-блокова конструкція з отриманням пари значень  $P_i$ ,  $u_i$  для фіксованого моменту розвитку навантаження на геомеханічну модель; для встановлення закономірностей впливу кожного геомеханічного параметра проводиться серія відповідних обчислювальних експериментів; методами кореляційно-дисперсійного аналізу встановлюються залежності зв'язку деформаційно-силової характеристики  $P(u)$  кріпильної конструкції з основними впливовими геомеханічними параметрами.

За викладеними методичними принципами розрахунки проводяться у наступній послідовності: для кожної з трьох груп текстур надвугільної товщі будується геомеханічна модель і проводиться її розрахунок у пружно-пластичній постановці при навантаженні верхньої межі моделі геостатичним тиском 15 МПа, що відповідає максимальній глибині  $H = 600$  м проведення досліджень; варіація показника  $H/R$  виконується автоматично за рахунок «покрокової» процедури обчислень у пружно-пластичній задачі; знімання показань НДС проводиться при значеннях  $H/R = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$  і  $90$  м/МПа. Вивчається НДС на предмет встановлення зони концентрації інтенсивності напружень  $\sigma$ , де найбільш вірогідна поява квазіпластичних шарнірів; вихідна геомеханічна модель модернізується шляхом розподілу породних шарів на блоки в місцях утворення квазіпластичних шарнірів; обчислювальний експеримент повторюється для даного значення  $H/R$ ; для інших значень  $H/R$  процедура виконується окремо; складаються розрахункові схеми для кожної з трьох розпірно-блокових систем, де основна увага приділяється центральним породним блокам, для яких розраховується перекидний і відновлювальний моменти по кожному виду навантаження; їх співвідношення визначає реакцію  $P$  кріпильної конструкції;



1 – група I; 2 – група II; 3 – група III

Рисунок 9 – Деформаційно-силові характеристики  $P(u)$  кріпильної конструкції, що включає рамне кріплення і комбіновану анкерну систему, при зміцненні порід покрівлі по групах їх текстури: — варіант знижених механічних властивостей; - - - «основний» варіант усереднених механічних властивостей; - · - · варіант підвищених механічних властивостей

максимальної реакції  $P_{\max}$  (рис. 10) кріпильної системи та її максимальної піддатливості  $u_{\max}$  (рис. 11).

Отримано наступні кореляційні залежності ( $r = 0,8$ ):

$$\text{Група I} \quad P_{\max} = 206(H/R)^{0,009R_{\text{зак}}} ; \quad (15)$$

$$\text{Група II} \quad P_{\max} = (397 - 6,9R_{\text{зак}})(H/R)^{0,016(1+R_{\text{зак}})} ; \quad (16)$$

$$\text{Група III} \quad P_{\max} = (224 - 4,86R_{\text{зак}})(H/R)^{0,024(5+R_{\text{зак}})} . \quad (17)$$

$$\text{Група I} \quad u_{\max} = (12,1 - 0,089R_{\text{зак}})H/R, \text{ мм}; \quad (18)$$

$$\text{Група II} \quad u_{\max} = (10,3 - 0,061R_{\text{зак}})H/R, \text{ мм}; \quad (19)$$

$$\text{Група III} \quad u_{\max} = (12,5 - 0,190R_{\text{зак}})H/R, \text{ мм}. \quad (20)$$

Оптимізація здійснюється шляхом пошуку таких параметрів елементів кріпильних конструкцій (рамного кріплення, сталеполімерних і канатних анкерів, стояків кріплення посилення), за яких їх деформаційно-силова характеристика максимально наближається до раніше встановлених раціональних (оптимальних)

визначається величина вертикального переміщення  $u$  (піддатливості) за кожного фіксованого значення  $H/R$  у точці центрального квазіпластичного шарніру на контакті нижнього породного шару з рамним кріпленням; за результатами обчислень складається таблиця значень  $P$  і  $u$  в досліджуваному діапазоні зміни  $H/R$ ; ці відомості перетворюються у графічні та емпіричні залежності з урахуванням варіації механічних характеристик заанкерованих породних шарів (рис. 9).

Емпіричні залежності  $P(u)$  мають вигляд:

$$\text{Група I} \quad P(u) = 198 + 35,5u^{0,19R_{\text{зак}}^{0,28}} ; \quad (12)$$

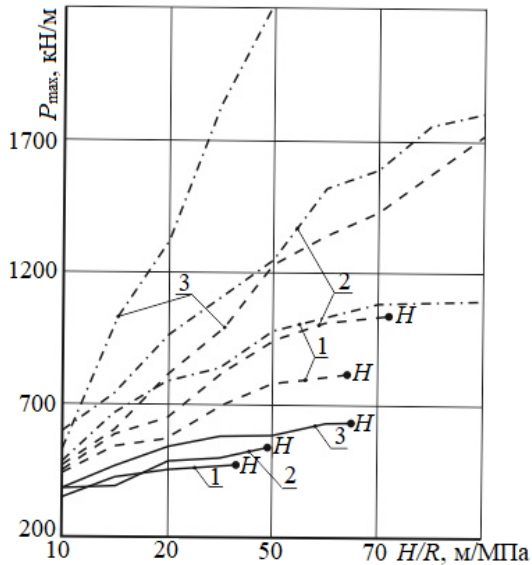
$$\text{Група II} \quad P(u) = 207 + 34,6u^{0,19R_{\text{зак}}^{0,32}} ; \quad (13)$$

$$\text{Група III} \quad P(u) = 215 + 30,9u^{0,19R_{\text{зак}}^{0,38}} , \quad (14)$$

де  $R_{\text{зак}}$  – середньозважений розрахунковий опір стиску заанкерованих порід покрівлі; коефіцієнт кореляції  $r = 0,75$ .

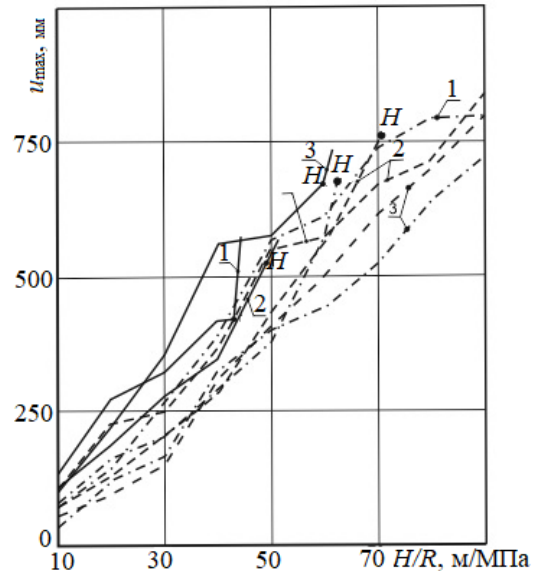
Встановлено графічний зв'язок з геомеханічним показником  $H/R$

значень. Задає шлях цілеспрямованому перебору варіантів та їх сполучень проведений аналіз відповідності функцій  $P_{\max}(H/R)$ ,  $u_{\max}(H/R)$  та їх раціональних (оптимальних) значень  $P_p(H/R)$ ,  $u_A(H/R)$ , фрагменти якого показані на рис. 12 та рис. 13.



1 – група I; 2 – група II; 3 – група III;

Рисунок 10 – Залежність реакції опору  $P_{\max}$  кріпильної конструкції від геомеханічного показника  $H/R$  по групах узагальнених текстур: варіант знижених (—), усереднених (---) і підвищених (-·-·-) механічних властивостей порід заанкерованої покрівлі



1 – група I; 2 – група II; 3 – група III;

Рисунок 11 – Залежність піддатливості  $u_{\max}$  кріпильної конструкції від геомеханічного показника  $H/R$  по групах узагальнених текстур: варіант знижених (—), усереднених (---) і підвищених (-·-·-) механічних властивостей порід заанкерованої покрівлі

Напрями пошуку раціональних параметрів кріпильної конструкції у сукупності з набором отриманих залежностей складають повний комплект для вирішення проблеми ресурсозберігаючого підтримання виїмкових виробок в умовах шахт Західного Донбасу.

Вибір раціональних параметрів кріпильних систем базується на серії розрахунків деформаційно-силових характеристик  $P(u)$  широкої низки конструкцій, об'єднаних двома умовами: охоплення максимально широкого кола фактичних конструктивних рішень на шахтах Західного Донбасу; вивчення стану практично всіх виробок, де як складова застосовується (або була використана) комбінована анкерна система. У методичному плані область доцільного застосування тієї чи іншої кріпильної конструкції розділена на наступні групи.

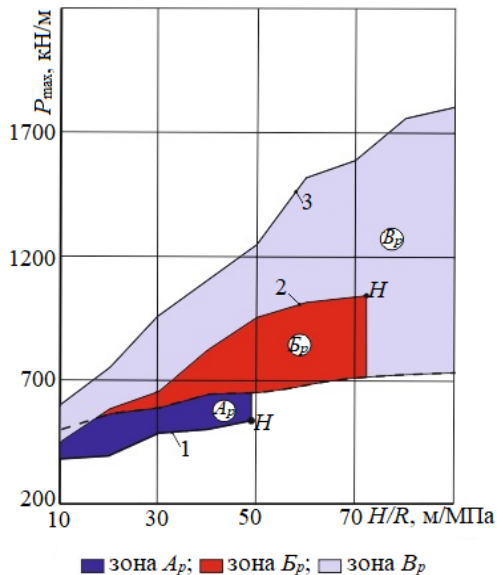


Рисунок 12 – До порівняльного аналізу відповідності реакції  $P_{\max}$  кріпильної конструкції (—) і її величини  $P_p$  раціонального опору (---) залежно від геомеханічного показника  $H/R$ : варіант знижених (1), усереднених (2) і підвищених (3) механічних властивостей порід заанкерованої покрівлі

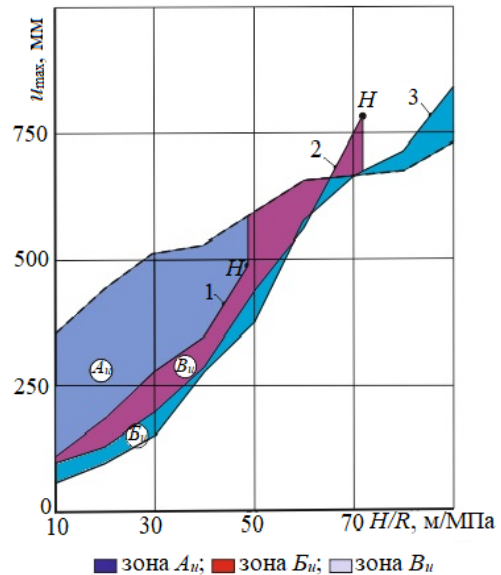


Рисунок 13 – До порівняльного аналізу відповідності піддатливості  $u_{\max}$  кріпильної конструкції (—) і її оптимальної величини  $u_A$  (---) залежно від геомеханічного показника  $H/R$ : варіант знижених (1), усереднених (2) і підвищених (3) механічних властивостей порід заанкерованої покрівлі

*Сприятливі гірничо-геологічні умови:* помірні прояви гірського тиску дозволяють зберегти площу залишкового перерізу на рівні 75 – 90% (на ділянці після проходження лави з урахуванням підривання підшви); незворотні пластичні деформації рамного кріплення мінімальні, несуттєво спотворюють її початкову форму при збереженні практично на паспортному рівні несучої здатності; сприятливі умови узагальнено характеризуються діапазоном зміни геомеханічного показника  $10 \text{ м/МПа} \leq H / R \leq 30 \text{ м/МПа}$ .

*Умови помірної інтенсивності проявів гірського тиску:* у першому наближенні діапазон варіації геомеханічного показника  $30 \text{ м/МПа} \leq H / R \leq 50 \text{ м/МПа}$ ; після проходження лави величина залишкового перерізу зберігається на рівні 60 – 75%; деформації традиційних кріпильних конструкцій більш суттєві і для забезпечення експлуатаційного стану виїмкових штреків при їх повторному використанні доцільно застосовувати комбіновані анкерні системи.

*Складні гірничо-геологічні умови* переважно відповідають значенням геомеханічного показника  $H / R > 50 \text{ м/МПа}$  та характеризуються інтенсивними проявами гірського тиску; якщо не виконувати певних ремонтно-відновлювальних робіт, то втрата перерізу близько 50 – 60% вже не допускає повторного використання виробки; для цих умов обґрунтовано вважаємо високу ефективність застосування комбінованих анкерних систем.

Для усіх груп гірничо-геологічних умов від вельми сприятливих до складних проведено достатню кількість обчислювальних експериментів, окремі з яких наведено на рис. 14 та рис. 15 у вигляді епюр НДС різноманітних кріпильних конструкцій.

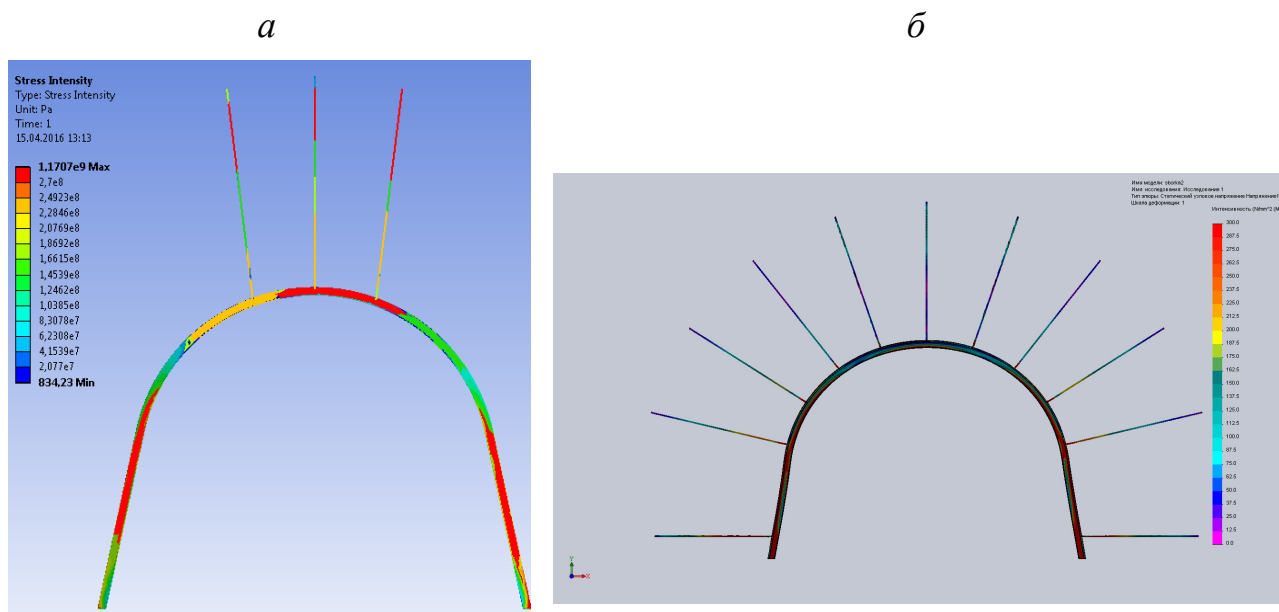


Рисунок 14 – Епюри інтенсивності напружень  $\sigma$  в деяких кріпильних конструкціях для сприятливих гірничо-геологічних умов (а, б)

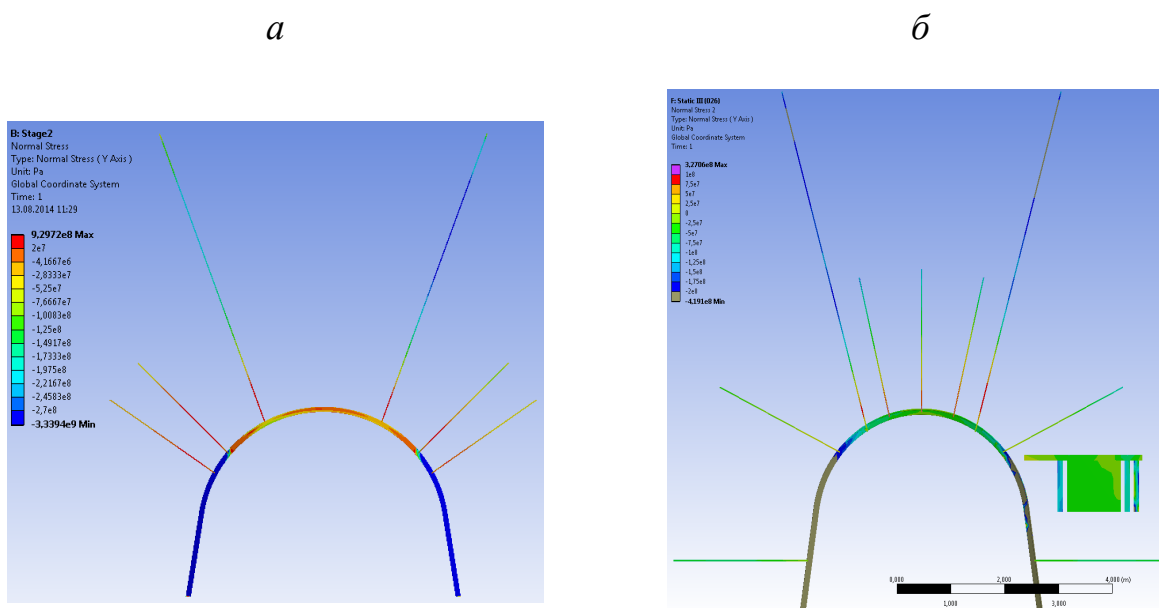


Рисунок 15 – Епюри вертикальних напружень  $\sigma_y$  в деяких кріпильних конструкціях для помірних (а) і складних (б) гірничо-геологічних умов

Для усіх досліджених кріпильних конструкцій виконана послідовність розрахунків за викладеним раніше алгоритмом визначення деформаційно-силової характеристики та отримані рівняння регресії для визначення параметрів  $P_{\max}$  і  $u_{\max}$  для усіх груп гірничо-геологічних умов і типів текстури вуглевмісного

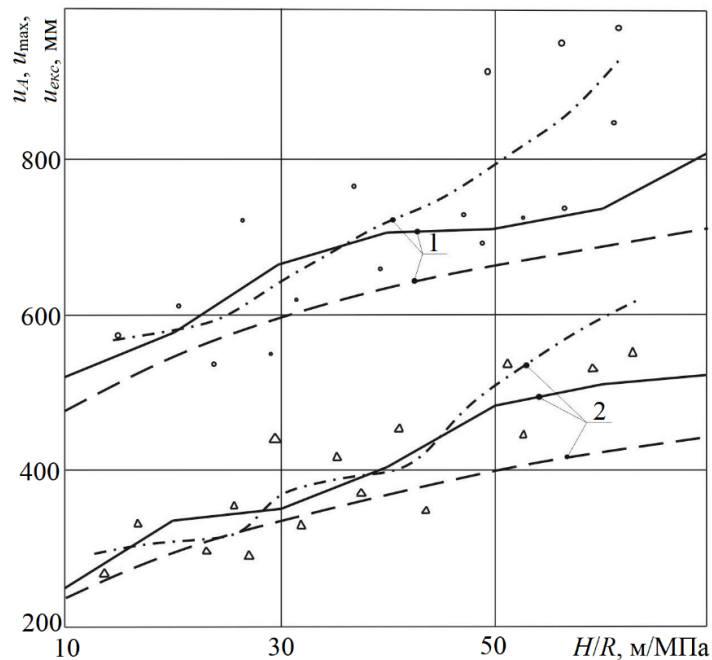


масиву. Для прикладу наведено кореляційні залежності при текстурі групи I у складних гірничо-геологічних умовах

$$P_{\max} = 588R_{\text{зак}}^{-0,2} (H / R)^{0,021R_{\text{зак}}}, \text{ кН/м}; \quad (21)$$

$$u_{\max} = 530R_{\text{зак}}^{-0,32} (H / R)^{0,21}, \text{ мм.} \quad (22)$$

Оцінку ступеня адекватності та достовірності результатів аналітичних досліджень проведено за сукупністю інструментальних шахтних спостережень у діючих виробках та на основі технічної документації маркшейдерських зйомок на вже відпрацьованих виїмкових ділянках. Для відносного розділення оцінки ступеня оптимальності режимів взаємодії масиву з кріпильними конструкціями та результатів керування їх деформаційно-силовою характеристикою розроблено нову методику проведення шахтних експериментів і порівняльного аналізу отриманих даних. Приклади для двох кріпильних конструкцій наведено на рис. 16 та рис. 17.



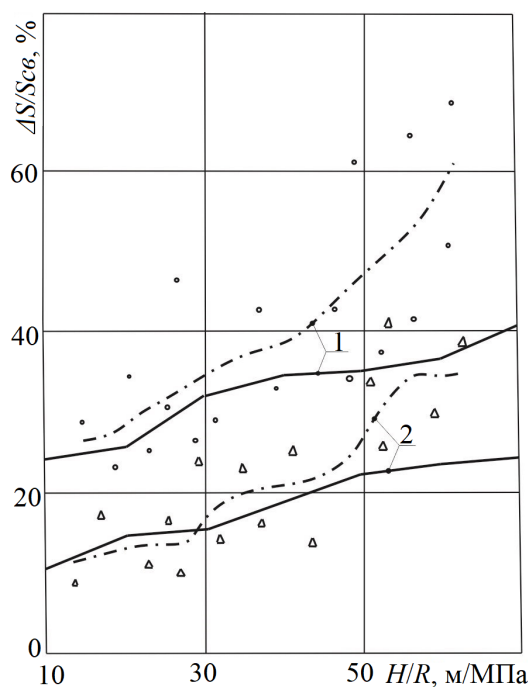
1 – група I текстури масиву з кріпильною конструкцією без канатних анкерів; 2 – група III текстури масиву з кріпильною конструкцією з комбінованою анкерною системою

Рисунок 16 – До аналізу експериментальних даних та аналітичних розрахунків за фактором зміщень покрівлі ( $R_{\text{зак}} = 14 - 20$  МПа): —  $u_A^{I,III}$  – оптимальні зміщення покрівлі виробки; - - -  $u_{\max}^{I,III}$  – максимальна піддатливість кріпильної конструкції; - · - · «о» і «Δ» – експериментальні дані опускання покрівлі та їх екстраполяція  $u_{\text{екс}}^{I,III}$

Підсумкам порівняльного аналізу даних шахтних експериментів і розрахункових залежностей слід надати позитивну оцінку: відхилення для

більшості закономірностей змінювалися в діапазоні від декількох відсотків до 20 – 30%.

Узагальнюючим результатом виконаних досліджень є розробка методик і рекомендацій, які забезпечують цілеспрямований вибір кріпильних конструкцій із застосуванням комбінованих анкерних систем, працюючих у режимі опору, близькому до оптимального, що дозволяє мінімізувати навантаження на них у різних гірничо-геологічних умовах підтримання виїмкових виробок, які повторно використовуються у слабометаморфізованому вуглевмісному масиві. У зв'язку з цим розроблено дві результуючі методики. «Методика керування параметрами проявів гірського тиску при повторному використанні виїмкових виробок» призначена для мінімізації навантаження на кріпильні конструкції у конкретних геомеханічних умовах. «Методика вибору раціональних кріпильних конструкцій з комбінованими анкерними системами» дозволяє вибрати найбільш ефективні з них, що працюють в режимі, близькому до оптимального; рекомендації щодо раціональних параметрів кріпильних систем наведено в табл. 2 та табл. 3, де також обґрунтовано область доцільного застосування комбінованих анкерних систем – вона обмежена умовами: досить стійка безпосередня покрівля з розрахунковим опором стиску заанкерованих порід  $R_{зак} \geq 14 - 20$  МПа при діапазоні зміни геомеханічного показника  $H / R \leq 45 - 50$  м/МПа.



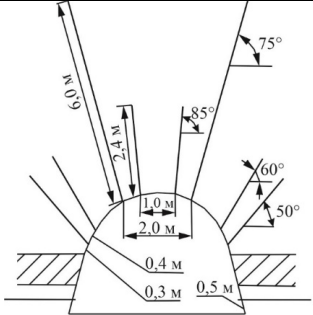
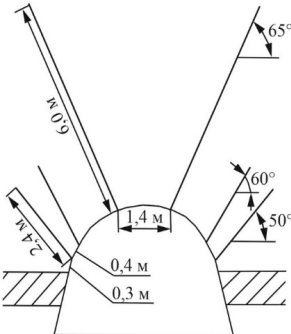
1 – група I текстури масиву з кріпильною конструкцією без канатних анкерів; 2 – група III текстури масиву з кріпильною конструкцією з комбінованою анкерною системою

Рисунок 17 – До аналізу експериментальних даних та аналітичних розрахунків ( $R_{зак} = 14 - 20$  МПа) за фактором втрати  $\Delta S/S_{св}$  перерізу виробки: —  $u_A^{I,III}$  – при оптимальному режимі взаємодії масиву з кріпильною конструкцією; - - - «о» і «Δ» – експериментальні дані втрати перерізу та їх екстраполяція

Таблиця 2 – Рекомендовані кріпильні конструкції та їх параметри у переважно сприятливих гірничо-геологічних умовах

Схема та параметри кріплення конструкції	Геомеханічний показник $H/R$ , м/МПа	Розрахунковий опір стиску заанкерованої покрівлі $R_{зак}$ , МПа	Група текстури порід покрівлі виробки	Крок встановлення рам, м
	$\leq 45 - 50$	$\geq 14 - 20$	I	0,8
			II	1,0
	$\leq 45 - 50$	$\geq 14 - 20$	II	0,8

Таблиця 3 – Рекомендовані кріпильні конструкції та їх параметри у складних і середньої складності гірничо-геологічних умовах

Схема та параметри кріпильної конструкції	Геомеханічний показник $H/R$ , м/МПа	Розрахунковий опір стиску заанкерованої покрівлі $R_{зак}$ , МПа	Група текстури порід покрівлі виробки	Крок встановлення канатних анкерів, м
	10 – 90	3 – 7	I	1,6
			II, III	2,4
	$\geq 50$	8 – 13	I	3,2
	$\leq 70$	8 – 13	I	2,4
	10 – 90	8 – 13	II	3,2
			III	4,0

Методики прийнято до використання на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» з фактичним економічним ефектом у розмірі 388,35 млн грн.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальну наукову проблему оптимізації режимів взаємодії вуглевмісного масиву слабометаморфізованих порід з інноваційними кріпильними конструкціями, які включають комбіновані анкерні системи для підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються; сутність результатів полягає в обґрунтуванні механізму та встановленні закономірностей впливу деформаційно-силових характеристик кріпильних конструкцій на процес мінімізації параметрів проявів гірського тиску, що дозволило сформулювати єдину стратегію їх ресурсозберігаючого вдосконалення для підвищення надійності відпрацювання вугільних пластів у складних гірничо-геологічних умовах.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному.

1. На базі аналізу існуючих ресурсозберігаючих технологій підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються, із застосуванням сталеполімерних і канатних анкерів обґрунтовано необхідність розробки механізму зрушення заанкерованого вуглевмісного масиву у взаємозв'язку і взаємовпливі всіх кріпильних елементів між собою з обов'язковим урахуванням особливостей текстури прилеглих порід. Сформовано базу для визначення кількісних закономірностей взаємозв'язку геомеханічних факторів і деформаційно-силових характеристик інноваційних кріпильних конструкцій, що включають комбіновані анкерні системи.

2. Вперше розроблено методичні принципи мінімізації навантаження на кріпильну конструкцію виїмкових виробок, що повторно використовуються, побудовані на комбінації багатоваріантних розрахунків за допомогою МСЕ (визначення деформаційно-силової характеристики масиву, що знеміцнюється) та положень нормативних документів з розрахунку розмірів склепіння природної рівноваги (деформаційно-силової характеристика порід склепіння). Тестування методичних принципів і результатів мінімізації навантаження на кріпильну конструкцію в умовах слабометаморфізованих порід вуглевмісної товщі показало їх достатню адекватність і достовірність.

3. Вперше встановлено закономірності впливу геомеханічних факторів на вибір оптимальних параметрів деформаційно-силової характеристики кріпильної конструкції: її мінімально необхідна реакція і величина піддатливості. Закономірності отримані у вигляді графіків і рівнянь регресії з розрахунку оптимальних параметрів взаємодії.

4. Обґрунтовано нові методичні положення послідовної реалізації етапів з оптимізації режимів роботи кріпильної конструкції, що включає рамне кріплення у поєднанні з комбінацією сталеполімерних і канатних анкерів. Розкрито сутність трьох підходів до вирішення проблеми розрахунку деформаційно-силових характеристик елементів, що складають дану кріпильну конструкцію, які базуються на поєднанні та взаємному доповненні результатів досліджень на основі багатоваріантних обчислювальних експериментів та аналітичних методів будівельної механіки зі сполучною ланкою у вигляді розвитку уявлень про механізм взаємодії вантажонесучих елементів між собою і з прилеглим породним масивом у зоні впливу очисних робіт.

5. Розроблено схематичні уявлення про механізм утворення розпірних структур і зв'язку їх деформаційно-силових характеристик з текстурними особливостями порід покрівлі в межах досяжності зміцнюючого ефекту від канатних анкерів. Вперше розроблено загальний і пошаровий механізм опору кожної розпірно-блокової структури, що входить в армопородну конструкцію.

6. Обґрунтовано принцип поєднання технологічних прийомів обчислювального експерименту з класичними положеннями методів будівельної механіки, на основі якого розроблено нову методику оцінки стану та розрахунку деформаційно-силової характеристики армопородної структури.

7. Встановлено вплив міцності порід заанкерованої покрівлі на деформаційно-силову характеристику кріпильної конструкції та її зв'язок з геомеханічним показником  $H/R$ . Отримано три групи емпіричних функцій для повного опису режимів роботи кріпильної конструкції, які спільно з критеріями мінімізації гірського тиску створили основу для пошуку оптимальних рішень з ресурсозберігаючого забезпечення стійкості виїмкових виробок, що повторно використовуються і підтримуються у слабометаморфізованому масиві порід незначної міцності.

8. На конкретних прикладах доведено можливість досягнення цілком задовільної відповідності деформаційно-силової характеристики кріпильних конструкцій оптимальним значенням, за яких мінімізується інтенсивність проявів гірського тиску. Обґрунтовано, що саме режим роботи кріпильної конструкції, близький до оптимального, дозволяє на непрямих показниках (зміщення контуру виробки, величина втрати площі її поперечного перерізу, ріст нахльосту в замкових з'єднаннях рамного кріплення), які визначаються експериментально, оцінити ступінь адекватності й достовірності розроблених методик оптимізації параметрів взаємодії масиву з кріпленням і розрахунку його раціональної деформаційно-силової характеристики.

9. Отримано сім'ю рівнянь регресії, що визначають режим опору цілої низки кріпильних конструкцій. За параметрами максимального опору  $P_{\max}$  та максимальної піддатливості  $u_{\max}$  з'явилася можливість обґрунтованого вибору кріпильних конструкцій практично для всього діапазону варіації геомеханічних умов підтримання виробок у слабометаморфізованому гірському масиві.

10. Оцінку ступеня адекватності та достовірності результатів аналітичних досліджень проведено за сукупністю інструментальних шахтних спостережень в діючих виробках та на основі технічної документації маркшейдерських зйомок на вже відпрацьованих виїмкових ділянках. Підсумками порівняльного аналізу даних шахтних експериментів та розрахункових залежностей слід дати позитивну оцінку: відхилення для переважної більшості закономірностей змінювалися у діапазоні від кількох відсотків до 20 – 30%, що є цілком задовільним результатом щодо надійності гірничотехнічних розрахунків. Узагальнюючи весь обсяг виконаних досліджень, необхідно констатувати:

– доведено адекватність досліджуваним геомеханічним умовам розробленої методики оптимізації режимів взаємодії масиву гірських порід з кріпильними конструкціями на прикладах цілої низки їх варіантів; методика дозволяє мінімізувати навантаження на кріплення у конкретній геомеханічній ситуації

ведення очисних робіт;

– обґрунтовано достовірність методики вибору раціональних кріпильних конструкцій з режимом роботи, близьким до оптимального;

– аналітично та експериментально обґрунтовано область доцільного застосування комбінованих анкерних систем для підтримання виїмкових виробок, що повторно використовуються у слабометаморфізованому вуглевмісному масиві – умови обмеження раціонального використання комбінованих анкерних систем: досить стійка безпосередня покрівля з розрахунковим опором стиску заанкерованих порід  $R_{зак} \geq 14 - 20$  МПа при діапазоні зміни геомеханічного показника  $H / R \leq 45 - 50$  м/МПа.

11. Методики прийнято до використання на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», вони дозволяють мінімізувати прояви гірського тиску та здійснювати єдину стратегію ресурсозберігаючого вдосконалення кріпильних конструкцій виїмкових виробок, що повторно використовуються і підтримуються у вуглевмісному масиві слабометаморфізованих гірських порід.

12. Загальна протяжність виробок, що повторно використовувались та підтримувались завдяки запропонованим рекомендація на шахтах ім. Героїв Космосу та «Павлоградська» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» складає 21,5 км (за період 2017 – 2023 рр.).

13. Сумарний фактичний економічний ефект від впровадження наукових розробок на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» становить 388,35 млн грн, участь автора – 77,67 млн грн.

**Основні положення і результати дисертації опубліковані в наступних роботах:**

1. Бондаренко, В.И., Ковалевская, И.А., Симанович, Г.А., Барабаш, М.В., **Снигур, В.Г.**, & Гусев, А.С. (2017). *Комбинированные анкерные системы для повторного использования горных выработок*. Дніпро, Україна: ЛізуновПрес, 188 с.

2. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Varabash, M., Chervatiuk, V., Husiev, O., & **Snigur, V.** (2020). *Combined roff-bolting systems of mine workings*. The Netherlands: CRC Press/Balkema, 254.

3. **Снигур, В.Г.** (2014). Закономерности пучения пород почвы пластовых выработок. *Уголь Украины*, (7), 3-5.

4. Ковалевская, И.А., **Снигур, В.Г.**, Симанович, Г.А., & Гусев, А.С. (2014). Обоснование и расчет канатных анкеров в крепежной системе выемочных выработок. *Уголь Украины*, (12), 30-33.

5. Бондаренко, В.И., **Снигур, В.Г.**, Ковалевская, И.А., Симанович, Г.А., & Гусев, А.С. (2015). Конструкции и оптимизация параметров опорных плит крепи горных выработок из спецпрофиля СВП. *Уголь Украины*, (3-4), 55-59.

6. Symanovych, G.A., Chervatiuk, V.G., **Snigur, V.G.**, & Malykhin, O.V. (2015). Displacement mechanism of above-the-coal strata and loading on support along extraction mine working behind the longwall. *Mining of Mineral Deposits*, 9(3), 299-306.

7. **Snigur, V.**, Malashkevych, D., & Vvedenska, T. (2016). Tendencies of coal industry development in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 1-8.

8. Bondarenko, V., Hardygora, M., Symanovych, H., Sotskov, V., & **Snihur, V.** (2016). Numerical methods of geomechanics tasks solution during coal deposits' development. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3): 1-12.
9. Kovalevska, I., Symanovych, H., Barabash, M., & **Snihur, V.** (2017). Research into rock pressure manifestations in interstratal rocks during descending and simultaneous mining of C<sub>9</sub> and C<sub>10</sub><sup>top</sup> coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, 11(1), 50-56.
10. Kovalevska, I., & Barabash, M., & **Snihur, V.** (2018). Development of a research methodology and analysis of the stress state of a parting under the joint and downward mining of coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 76-84.
11. Ковалевская, И.А., Гусев, А.С., **Снигур, В.Г.**, & Малова, О.К. (2019). Экспериментальные исследования устойчивости выемочных выработок в весьма слабых породах. *Геотехнічна механіка*, (144), 218-228.
12. **Снигур В.Г.** (2022). Методологічні принципи та рекомендації з розробки інноваційних технологій підтримки виробок, що повторно використовуються, на шахтах Західного Донбасу. *Збірник наукових праць НГУ*, (68), 67-80.
13. Kovalevska, I., Zhuravkov, M., Chervatiuk V., Husiev, O., & **Snihur, V.** (2019). Generalization of trends in the influence of geomechanics factors on the choice of operation modes for the fastening system in the preparatory mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 1-11.
14. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I., Symanovych, H., Barabash, M., & **Snihur, V.** (2020). Peculiarities of mining the protecting pillar in the laminal massif of soft rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 17-25.
15. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Cawood, F., Husiev, O., **Snihur, V.**, & Jimu, D. (2021). Development and testing of an algorithm for calculating the load on support of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 15(1), 1-10.
16. **Snihur, V.**, Bondarenko V., Kovalevska I., Husiev O., & Shaikhlislamova I. (2022). Optimization solution substantiation for resource-saving maintenance of workings. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 9-18.
17. **Snigur, V.**, Kovalevska, I., Symanovych, G., & Gusiev, O. (2015). Formation of limit equilibrium zone in marginal rocks of excavation mine working. [Electronic resource] 1 electronic optical drive (2,25 MB; CD-ROM). *Szkola Eksploatacyj Podzemnej*.
18. Бондаренко, В., **Снигур, В.**, & Соцков, В. (2016). Разработка и анализ геомеханической модели селективной выемки пласта C<sub>8</sub><sup>#</sup> шахты «Западно-Донбасская». *Школа підземної розробки: міжнар. наук.-практ. конф.:* тези доп. (с. 33-34). Бердянськ, Україна.
19. **Снигур, В.**, Малашкевич, Д., & Русских, В. (2016). Особенности технологии селективной отработки тонких и весьма тонких угольных пластов. *Школа підземної розробки: міжнар. наук.-практ. конф.:* тези доп. (с. 23-24). Бердянськ, Україна.
20. **Snihur, V.**, Barabash, M., & Malashkevych, D. (2018). The main trends of coal mining in Ukraine. *Szkola Eksploatacyj Podzemnej*. Krakow, Poland.
21. Ковалевская, И., **Снигур, В.**, Малова, О., & Малашкевич, Д. (2018). Воздействие песчаника на структурные преобразования почвы обрабатываемого пласта. *Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.:* тези доп. (с. 17-18). Бердянськ, Україна.

22. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Symanovych, H., Barabash, M., & **Snihur, V.** (2018). Assessment of parting rocks weak zones under the joint and downward mining of coal seams. *E3S Web of Conferences*, (66), 03001.

23. Kovalevska, I., Barabash, M., Husiev, O., & **Snihur, V.** (2018). Interaction of deformation-strength characteristics of the support load-bearing elements in the preparatory workings. *E3S Web of Conferences*, (60), 00002.

24. **Snigur, V.**, Kovalevska, I., Symanovych, G., Gusiev, O., & Biatov, S. (2019). Influence of geomechanical factors on the state of development workings. In *Szkola Eksploatacji Podzemnej* (25-27 February), Krakow, Poland.

25. Kovalevska, I., Pilecki, Z., Husiev, O., & **Snihur, V.** (2019). Assessment of the mutual influence of deformation-strength characteristics of the fastening system elements. *E3S Web of Conferences*, (123), 01006.

26. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Husiev, O., Salieiev, I., & **Snihur, V.** (2019). Concept of workings reuse with application of resource-saving bolting systems. *E3S Web of Conferences*, (133), 02001.

27. Ковалевская, И.А., Гусев, А., & **Снигур, В.** (2019). Оценка взаимовлияния деформационно-силовых характеристик элементов крепежной системы. *Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп.* (с. 15-16). Бердянськ, Україна.

28. Ковалевская, И., **Снигур, В.**, & Гусев, А. (2020). Устойчивость надрабатываемого слабометаморфизованного массива вокруг горной выработки. *Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп.* (с. 9-10). Бердянськ, Україна.

29. Барабаш, М., Ковалевская, И., & **Снигур, В.** (2021). Основные принципы разработки рекомендаций по инновационным технологиям поддержания повторно используемых выработок. *Українська школа гірничої інженерії: міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп.* (с. 7-8). Бердянськ, Україна.

30. Symanovych, G., Astafiev, D., Vivcharenko, O., & **Snigur, V.** (2015). Increasing of yielding of frame-anchor support steadiness. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 45-48.

31. Бондаренко В.И., Ковалевская, И.А., Симанович, Г.А., & Барабаш М.В., **Снигур, В.Г.** (2017). Влияние горизонтальных напряжений на структурные преобразования пород междупластья совместно отработываемых угольных пластов  $c^B_{10}$  и  $c_9$ . *Уголь Украины*, (4), 35-39.

32. Ковалевская, И.А., Барабаш, М.В., **Снигур, В.Г.**, & Малова, О.К. (2018). Влияние песчаника на формирование аномалий горного давления в почве пласта, отработываемого в свите первым. *Уголь Украины*, (3):12-16.

33. Ковалевская, И.А., Симанович, Г.А., Гусев, А.С., & **Снигур, В.Г.** (2018). К обоснованию повышения устойчивости выемочных выработок в весьма слабых породах. *Уголь Украины*, (12), 4-9.

**Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві:**  
 [1, 2] – проведення експериментальних досліджень, аналіз та обробка результатів;  
 [4, 11, 33] – розрахунок та аналіз НДС кріплення; [5] – розробка конструкції опорних плит; [6, 8, 30 – 32] – обґрунтування параметрів рамно-анкерного кріплення; [7] – аналіз тенденцій видобутку вугілля; [9, 10, 22, 23] – аналіз НДС



вантажонесучих елементів кріпильної системи; [13 – 16, 25, 26] – аналіз літературних джерел, опрацювання та систематизація даних; [17, 19, 24, 27] – аналіз гірничотехнічних умов; [18, 21, 28] – розробка геомеханічної моделі; [20] – аналіз трендів вугільної промисловості України; [29] – вибір інноваційних технологій підтримання гірничих виробок.

## АНОТАЦІЯ

*Снігур В.Г.* Наукові основи оптимізації взаємодії інноваційного кріплення виробок, що повторно використовуються, з гірським масивом шахт Західного Донбасу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2024.

Захищаються встановлені закономірності: керування гірським тиском у напрямі мінімізації навантаження кріпильних систем виїмкових виробок, що повторно використовуються у масиві слабометаморфізованих гірських порід; взаємодія розпірно-блокових структур (сформованих комбінованими анкерними системами) між собою, рамним кріпленням і прилеглим породним масивом; раціональних режимів опору широкій варіації конструктивних схем підтримання виїмкових виробок. Виявлені закономірності в комплексі з розробленим алгоритмом оптимізації режимів взаємодії є науковою основою для здійснення єдиної стратегії ресурсозберігаючого удосконалення кріпильних конструкцій виїмкових виробок, що повторно використовуються. Створено низку нових методик розрахунку параметрів взаємодії вуглевмісного масиву з інноваційними кріпильними конструкціями, що включають комбіновані анкерні системи, які пройшли тестування та оцінені на адекватність і достовірність у ході широкомасштабних експериментальних досліджень на шахтах Західного Донбасу. Розроблено методики оптимізації режимів взаємодії масиву з кріпильними конструкціями та вибору їх раціональних параметрів з урахуванням застосування інноваційних комбінованих анкерних систем; вони прийняті до використання на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля».

*Ключові слова:* вугільна шахта, масив слабометаморфізованих гірських порід, виїмкові виробки, повторне використання, комбіновані анкерні системи, кріпильні конструкції, геомеханічні фактори, гірський тиск, взаємодія, оптимізація.

## ABSTRACT

*Snihur V.H.* Scientific bases for optimizing the innovative support interaction with the rock mass in reused mine workings of the Western Donbas mines. – Manuscript.

Dissertation submitted for the Doctorate Degree in Technical Sciences in the specialty 05.15.02 – Underground Mining of Mineral Deposits. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2024.

The presented dissertation is a completed scientific-research work in which the urgent scientific-technical problem of optimizing the interaction modes between the coal-bearing mass of weakly metamorphosed rocks and innovative fastening structures, including combined roof-bolting systems, has been solved in order to maintain reusable extraction workings; optimization solutions are based on disclosing the interaction process mechanism occurring in conjunction with the determined patterns of the impact of the deformation-strength characteristics of fastening structures on minimizing the parameters of rock pressure manifestations; this makes it possible to form a unified strategy for their resource-saving improvement to increase the reliability and safety of mining the coal seams in complex mining-geological conditions.

Based on the performed analysis of existing research and practical experience in the application of innovative technologies for maintaining mine workings, the relevance and novelty of the approach to optimizing the interaction modes between the rock mass and fastening systems in the conditions of weakly metamorphosed rocks under the direct influence of stope operations in reused extraction workings have been substantiated.

The research solves a set of interrelated tasks, structured into a single concept of combined approaches to controlling the parameters of rock pressure manifestations and taking into account the peculiarities of using innovative fastening systems to maintain reused extraction workings in a weakly metamorphosed coal-bearing mass; the following algorithm for realizing the research purpose is used.

The formulated principles of coordinating the operating modes of fastening elements and their general adaptation to the patterns of rock pressure manifestations have substantiated the need to study the interaction process within the framework of “force – displacement” (reflected by the concept of “deformation-strength characteristic”) with criteria for minimizing the rock pressure and the maximum possible approximation to the condition of equal strength elements that constitute the fastening structure. The mechanism of deformation and interaction of armored and rock thrust structures in the roof and frame support with the surrounding mass has been disclosed, which is the basis for determining the quantitative patterns of the interrelation between geomechanical factors and deformation-strength characteristics of fastening structures, including combined roof-bolting systems.

The methodological principles developed for the first time to minimize the load on the fastening structure of reused extraction workings are based on a combination of multivariate computational experiments using the finite element method (determination of the weakening mass deformation-strength characteristic) and the provisions of regulatory documents for calculating the parameters of the natural equilibrium arch (deformation-strength characteristic of the rocks in the arch). The methodology for obtaining the deformation-strength characteristic of a weakening mass provides the

patterns of its connection with the main influencing geomechanical factors, such as the depth of mine working location, the texture of rocks in the coal-overlying formation and their strength properties. When determining the deformation-strength characteristic of rocks in the natural equilibrium arch, the methodological provisions of the regulatory documents have been transformed and supplemented with account of such a phenomenon as limiting the arch size due to the fastening structure reaction.

For the first time, the patterns of geomechanical factors influencing on the choice of the fastening structure deformation-strength characteristic have been determined. The patterns obtained are in the form of graphs and regression equations. The stability of the power-law relationship between the fastening structure optimal parameters and the geomechanical index  $H/R$  has been revealed, regardless of the type of the coal-bearing mass texture. This makes it possible to implement a unified strategy of resource-saving improvement of fastening structures for reused extraction workings maintained in a weakly metamorphosed rock mass of small hardness.

Based on the analysis of the results of multivariate computational experiments, four main trends in the texture transformation of rocks in the coal-overlying formation around the extraction working have been distinguished, which are taken into account when optimizing the deformation-strength characteristics of spacer-block structures. For the first time, both the general and layer-by-layer resistance mechanisms of each spacer-block structure included in the armored and rock structure have been developed. At the same time, the mutual influence of all fastening elements in the process of resisting the rock pressure is taken into account and the direction of optimization and deformation-strength characteristics is substantiated.

The geomechanical reasons have been revealed that do not allow using the existing arsenal of methodologies for conducting the computational experiments, taking into account the requirements of the maximum possible adequacy and reliability of the results. An alternative is the substantiated principle of combining the technological methods of a computational experiment with the classical provisions of structural mechanics methods, on the basis of which a new methodology for assessing the state and calculating the deformation-strength characteristics of an armored and rock structure has been developed. This methodology includes the fulfillment of six consecutive positions from the search for current textural changes in the coal-overlying formation under the influence of stope operations, to the final determination of three groups of patterns necessary to optimize the fastening structure operating modes: the deformation-strength characteristic itself; the dependence of the load-bearing capacity and yielding property of the fastening structure on the geomechanical index  $H/R$  for all three types of generalized coal-bearing mass textures.

The obtained three groups of empirical functions, together with the criteria for minimizing the rock pressure, are the basis for searching for optimal solutions for resource-saving ensuring the stability of reused extraction workings maintained in a weakly metamorphosed rock mass of small hardness.

Based on the comparative analysis results of the data of mine experiments, as well as mine surveying of already mined-out areas and calculated dependencies, they have been positively assessed: deviations for the overwhelming majority of patterns change in the range from a few percent to 20 – 30%, which is a completely satisfactory result

in terms of the reliability of mining-technical calculations.

The developed methodologies of optimizing the interaction modes of the rock mass with innovative fastening structures and the choice of their rational parameters have been adopted for use at the mines of PJSC “DTEK Pavlohradvuhillia”. They make it possible to implement a unified strategy for resource-saving improvement of fastening structures for reused extraction workings maintained in a coal-bearing mass of weakly metamorphosed rocks.

The total actual economic effect from the implemented scientific developments at the mines of PJSC DTEK Pavlohradvuhillia is 388.35 million UAH, the author’s participation is 77.67 million UAH.

*Keywords:* coal mine, weakly metamorphosed rock mass, extraction workings, repeated use, combined roof-bolting systems, fastening structures, geomechanical factors, rock pressure, interaction, optimization.

**СНІГУР Василь Григорович**

**НАУКОВІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ  
ІННОВАЦІЙНОГО КРІПЛЕННЯ ВИРОБОК, ЩО ПОВТОРНО  
ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ, З ГІРСЬКИМ МАСИВОМ ШАХТ  
ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ**

(Реферат)

Підписано до друку 23.04.2024. Формат 60x90/16.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №63

Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19