

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

СТАДНІЧУК Микола Миколайович



УДК [622.012.2: 622.268.2]:622.8 (043.3)

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ  
ЗАСОБІВ ОХОРОНИ ДІЛЬНИЧНИХ ВИРОБОК ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2023

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук  
**Курносів Сергій Анатолійович,**  
Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова  
НАН України, старший науковий співробітник

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Гапєєв Сергій Миколайович,**  
завідувач кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки  
Національного технічного університету  
«Дніпровська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро)

доктор технічних наук, професор  
**Тютькін Олексій Леонідович**  
завідувач кафедри «Транспортна інфраструктура»  
Українського державного університету  
науки і технологій МОН України (м. Дніпро)

Захист відбудеться “12” вересня\_2023 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2а.

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

Автореферат розісланий “12” серпня 2023 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук



В.Г. Шевченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ефективність функціонування вугільних шахт суттєво залежить від стану дільничних виробок. На сучасних вугледобувних підприємствах прагнуть зберігати конвеєрні виробки для їх повторного використання в якості вентиляційних при відпрацюванні наступного суміжного виїмкового стовпа. Це сприяє підвищенню темпів видобутку вугілля за рахунок наступних чинників. По-перше, збереження конвеєрної виробки після проходу першої лави дозволяє застосовувати прямоточні схеми провітрювання, що знижує обмеження на швидкість відпрацювання вугільного пласта за газовим фактором. По-друге, повторне використання виробки пришвидшує підготовку наступного виїмкового стовпа за рахунок зменшення протяжності нових підготовчих виробок, що також сприяє зниженню витрат на їх проведення і кріплення.

Належна стійкість цих виробок значною мірою залежить від властивостей застосовуваних засобів їх охорони. Дільничні виробки є пластовими, тому після вилучення вугілля в їх борту з боку виробленого простору лави утворюється порожнина, висотою, що дорівнює потужності вугільного пласта. Засіб охорони призначений для заповнення цієї порожнини поблизу контуру виробки. Він повинен сприймати на себе навантаження від ваги порід підробленої покрівлі та запобігати витоку у вироблений простір лави свіжого струменю повітря і, навпаки, потраплянню метано-повітряної суміші у дільничну виробку, а також сприяти прискоренню обвалення підробленої покрівлі слідом за вибоєм лави за рахунок ефективного обрізання консолі завислих над виробкою порід для зменшення асиметричності навантаження рамного кріплення виробки і тиску покрівлі на засіб її охорони.

Процес видобутку вугілля відбувається в умовах інформаційної невизначеності, що обумовлено одночасним впливом на гірничі виробки цілого комплексу геологічних і технологічних факторів. Нестационарний стан геотехнічної системи «масив - гірничі виробки» ускладнює кількісну оцінку ступеня впливу цих факторів. Це призводить до помилок при оцінці ризику деформування гірничих виробок та виборі типів кріплення і розрахунку їх параметрів. Такі багатофакторні задачі можна ефективно вирішувати із застосуванням теорії ризиків, чого на даний час не зроблено. Також не встановлені закономірності зміни тиску порід на засоби охорони виробок в залежності від геологічних умов їх розташування та не розроблені методики вибору типів цих засобів і розрахунку їх параметрів.

*Таким чином, встановлення закономірностей тиску підробленої покрівлі вугільного пласта на засоби охорони виробки для ризик-орієнтованого обґрунтування їх раціональних типів і параметрів є актуальним науковим завданням, що має важливе значення для підвищення стійкості дільничних виробок.*

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано відповідно до «Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року», затвердженої Законом України від 21.04.2011 р. № 3268-VI; згідно з постановою Кабінету

Міністрів України від 07.09.2011 р. № 942 «Технології виявлення й оцінки корисних копалин, їх раціонального й безпечного видобутку»; з науковим напрямом держбюджетних тем Інституту геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, за якими автор був виконавцем: № III-63-12 «Фізико-хімічна механіка геотехнологічних систем: ідентифікація параметрів і управління» за розділом «Розвиток наукових основ фізико-хімічних методів підвищення ефективності технології використання структурованих суспензій в геотехнологічних системах» (№ ДР 0112U000493), № III-67-15 «Розвиток науково-технічних основ енергоперетворення вуглевмісної сировини різного ступеня метаморфізму, розділення її зневоднення та підвищення ефективності і надійності енергокомплексів» за розділом «Розвиток наукових основ підвищення ефективності процесів в киплячому шарі та утилізації низькопотенційного тепла в контактних і тепломасообмінних апаратах» (№ ДР 0115U002283), № III-74-19 «Розвиток наукових основ процесів енергоперетворення та вібраційної обробки природних і техногенних матеріалів та вуглецевмісної сировини, накопичення та отримання енергії з низькопотенційних і відновлюваних джерел» за розділом «Розвиток наукових основ удосконалення методів та процесів накопичення та отримання енергії з низькопотенційних і відновлюваних джерел для гірничих та енергогенеруючих підприємств» (№ ДР 0119U000453).

**Ідея роботи** полягає у використанні положень теорії ризиків і встановлених закономірностей тиску подробленої покрівлі вугільного пласта на засіб охорони виробки для обґрунтування його раціонального типу та параметрів.

**Мета роботи** полягає в обґрунтуванні параметрів та умов застосування засобів охорони дільничних виробок вугільних шахт для їх повторного використання.

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

1. Експертним методом парних порівнянь встановити закономірності зміни ризику деформування виробок в залежності від типів засобів їх охорони в різних геологічних умовах.

2. Дослідити можливість використання адитивних технологій для створення фізичних моделей гірського масиву і виробки, розробити конструкцію екструдера, що забезпечує необхідні параметри течії поліматеріалу в екструзійному апараті.

3. Виконати аналітичні і шахтні дослідження відповідності міцності засобу охорони виробки тиску подробленої покрівлі вугільного пласта в різних геологічних умовах.

4. Розробити та впровадити методики ризик-орієнтованого обґрунтування типу і розрахунку параметрів засобів охорони дільничних виробок повторного використання.

**Об'єкт досліджень** – процеси навантаження і деформування засобів охорони дільничних виробок при різній міцності порід, що її оточують.

**Предмет досліджень** – закономірності впливу тиску подробленої покрівлі вугільного пласта на деформування охоронних смуг з рідкого бетону.

**Методи досліджень.** У роботі використано комплексний метод досліджень, який включає аналіз та узагальнення наукового і практичного досвіду використання різних типів засобів охорони дільничних виробок та методів дослідження їх стану; експертний метод аналізу ризику деформування дільничної виробки в умовах інформаційної невизначеності; комплексування теорії ризиків з матричним методом парних порівнянь для розрахунку ризику деформування дільничних виробок і отримання якісної оцінки рейтингу різних типів засобів охорони в залежності від геологічних умов розташування виробки; шахтні дослідження напружено-деформованого стану засобів охорони дільничних виробок в умовах різних категорій обвалюваності покрівлі вугільного пласта.

**Наукові положення, які захищаються в дисертації.**

1. Критеріями доцільності використання різних типів засобів охорони виробок в залежності від геологічних умов є їх відповідність функції корисності: при раціональних витратах на зведення засобу охорони, ризики зміщень покрівлі і підшви виробки повинні бути мінімальними. Зі збільшенням суми експертних оцінок ймовірність деформування виробки знижується, а рейтинг засобу її охорони зростає за лінійними залежностями. Питома вага негативних наслідків від невиконання початкових вимог складає: вартість зведення засобу охорони – 0,13, ризик зміщень покрівлі виробки – 0,53, підшви – 0,33.

2. Тиск порід і відносна вертикальна деформація засобу охорони дільничної виробки зростають за логарифмічними залежностями від відстані до вибою лави та часу твердіння бетону. При важко- і середньообвалюваній покрівлі, у міру посування лави до відстані, що дорівнює кроку її обвалення, тиск інтенсивно зростає та в момент обвалення падає на 15-20%, а при легкообвалюваній покрівлі тиск зростає монотонно і на відстані 40-50 м стабілізується.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному.

1. Вперше отримано формулу для розрахунку коефіцієнта  $K_0$  впливу типу засобу охорони на зміщення  $U$  дільничних виробок, яка враховує ризик  $R_i$  деформування виробки, потужність  $m$  і кут нахилу  $\alpha$  вугільного пласта до горизонту та конструктивні параметри засобу охорони – його тип, ширину та місце розташування відносно виробки.

2. Розвинуто уявлення про механізм і вперше встановлені закономірності навантаження і деформування засобів охорони дільничних виробок із швидкоотвердуючої суміші в залежності від часу її твердіння і відстані до вибою лави, з врахуванням категорії стійкості покрівлі вугільного пласта.

3. Вперше розроблена математична модель течії пластичного середовища на виході з екструдера з урахуванням процесів теплообміну зі стінкою каналу, що нагрівається, та методом смуг отримано нові закономірності зміни поля швидкостей і температури цієї течії. Це дозволяє підвищити достовірність моделювання складних процесів гірничого виробництва.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей тиску підробленої покрівлі вугільного пласта на бетонну охоронну смугу та комплексуванні коефіцієнтів впливу факторів, що утворюють ризик її руйнування, для обґрунтування типу і параметрів засобів охорони виробки в різних геологічних умовах.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено нову ризикорієнтовану методику вибору раціонального типу засобу охорони дільничних виробок повторного використання, яка враховує гірничо-геологічні умови розташування виробки (категорію обвалюваності покрівлі і міцність безпосередньої підошви виробки) та вартість зведення засобу охорони.

2. Розроблено нову методику розрахунку параметрів засобів охорони дільничних виробок з урахуванням ризикоутворюючих факторів, яка дозволяє для різних гірничо-геологічних умов визначати максимально допустиму швидкість посування очисного вибою при існуючих параметрах охорони виробки або коригувати ці параметри при заданій швидкості посування лави.

3. Розроблені і запатентовані пристрої: для об'ємного друку підвищеної точності та швидкості моделювання за рахунок використання магнітно-кульового шарніра, для лазерного тривимірного друку з новим типом позиціонування оптичної системи, для тривимірного друку підвищеної надійності за рахунок модернізації оптичного вузла SLA технології. Це дозволяє підвищити достовірність моделювання складних процесів гірничого виробництва.

4. Розроблений і запатентований екструдер для тривимірного друку моделі гірського масиву і виробки, який дозволяє автоматизувати процес виготовлення еквівалентної суміші безпосередньо в корпусі екструдера, розширити його функціональні можливості за рахунок диференційованої подачі декількох компонентів. Це дозволяє керувати фізичними властивостями матеріалу у процесі друку та запобігатиме помилкам при дозуванні його компонентів.

**Реалізація результатів роботи.** Впровадження рекомендацій щодо параметрів і технології спорудження охоронно-ізолюючої смуги в умовах шахт «Червоноградська» та «Лісова» ДП «Львіввугілля» (Акти від 19 грудня 2022 р. і від 24 квітня 2023 р.) дозволило зменшити витрати цементно-мінеральної суміші на 27 % та зберегти конвеєрні штреки № 562 і № 166 для повторного використання в якості вентиляційних при відпрацюванні суміжного виїмкового стовпа. Отримані в дисертації результати увійшли до нормативного документу України «Інструкція щодо забезпечення стійкості дільничних виробок для повторного використання на вугільних шахтах».

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується коректністю постановки й вирішення задач із застосуванням фундаментальних положень теорії ризиків та механіки гірських порід, науковою обґрунтованістю та апробацією використаної методики досліджень; підготовкою і тестуванням в лабораторії вимірювального обладнання для проведення шахтних експериментів; статистичною оцінкою одержаних залежностей, достовірність якої склала не нижче 0,75.

**Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно сформульовано мету, ідею та задачі досліджень, наукові положення, новизна та практичне значення роботи, висновки та рекомендації щодо їх практичної реалізації. Автор брав безпосередню участь в організації та проведенні шахтних експериментів, у

розробці методик встановлення раціонального типу та параметрів засобів охорони виробок та рекомендацій щодо їх спорудження, а також в апробації та впровадженні результатів роботи. Автором встановлено закономірності навантаження і деформування засобів охорони дільничних виробок із швидкотвердіючої суміші в залежності від часу її твердіння і відстані до вибою лави, обґрунтовано параметри суміші для різних геологічних умов. Текст дисертації викладено автором самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та отримали позитивну оцінку на XX міжнародній конференції молодих вчених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ» (Дніпро, 27.11.2022) та «Szkola Eksploatacji Podziemnej 2023» (Kraków, 27.02-1.03.2023).

**Публікації.** Основний зміст роботи опубліковано в 12 друкованих працях, у тому числі 2 публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, 5 – спеціалізованих виданнях, 3 – патенти України, 2 – збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 175 найменувань на 20 сторінках, 6 додатків на 11 сторінках, містить 29 рисунків, 22 таблиці. Загальний обсяг дисертації становить 176 сторінок; основний текст – 139 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**В першому розділі** виконано аналіз існуючих засобів охорони виробок, досвіду застосування теорії ризиків при управлінні небезпечними виробництвами, та методів фізичного моделювання для дослідження технологічних процесів гірничого виробництва, систематизовані технології 3D друку за здатністю створення фізичних моделей гірського масиву і виробок.

Вагомих наукових результатів у вирішенні проблеми підтримання виробок досягли вчені ДонВУГІ, ДонНТУ, ІГТМ НАН України, ІФГП НАН України, НТУ «Дніпровська політехніка», УкрНІМІ, а також фахівці вугледобувних підприємств України. Однак ще залишаються невирішені задачі.

Досвід застосування різноманітних типів засобів охорони дільничних виробок в різних гірничо-геологічних умовах показує переваги використання жорстких бетонних смуг. Вони ефективно протидіють гірському тиску і сприяють обваленню підірваної покрівлі у виробленому просторі лави. У разі слабких порід підшви виробки слід комбінувати жорстку бетонну смугу з піддатливою накатною смугою з деревини.

На ризик деформування дільничної виробки, в залежності від типу засобу її охорони, впливає безліч геологічних та технологічних факторів, точні чисельні значення яких отримати неможливо. Тобто аналіз ризику здійснюється в умовах інформаційної невизначеності, тому доцільно використати експертний метод аналізу.

Моделювання на еквівалентних матеріалах дозволяє детально дослідити механізми деформування та руйнування гірничих виробок. Однак, фізичні моделі виготовляються вручну. Це обумовлює високу трудомісткість побудови складних моделей та низьку точність дотримання їх геометричних розмірів і

складу, що вносить суттєву похибку в кінцеві результати досліджень. Усунути перелічені недоліки здатна автоматизація процесу виготовлення моделей шляхом їх 3D друку екструзійним методом. В якості еквівалентних матеріалів слід застосовувати термопласти або піщано-полімерні суміші.

За результатами аналізу сформульовані ідея, мета і задачі, а також визначені методи досліджень.

**В другому розділі** із застосуванням положень теорії ризиків та матричного методу парних порівнянь обґрунтовані типи засобів охорони дільничних виробок для повторного використання, в залежності від геологічних умов їх розташування.

За методикою діючого в Україні нормативного документу, вплив очисних робіт на зміщення підготовчої виробки враховується коефіцієнтом типу засобу її охорони  $K_o$  і потужністю вугільного пласта  $m$ . Зі збільшенням  $K_o$  і  $m$  зміщення виробки  $U$  прямо-пропорційно зростають. Сумарне зміщення покрівлі та підшви при підтриманні виробки після проходження першої лави розраховують за формулою

$$U = 0,002 \cdot H \cdot K_o \cdot K_y \cdot K_s \cdot m, \quad (1)$$

де  $U$  – зміщення виробки, м;  $H$  – глибина розташування виробки, м;  $K_o$  – коефіцієнт впливу засобу охорони виробки на її стійкість;  $m$  – потужність вугільного пласта, м; безрозмірні емпіричні коефіцієнти:  $K_y$  – коефіцієнт стійкості гірських порід навколо виробки та  $K_s$  – коефіцієнт впливу ширини виробки на зміщення  $U$  її контуру визначають згідно з методикою.

Однак, при всіх типах засобів охорони виробок (ЗОВ), за винятком породних смуг, коефіцієнт  $K_o$  дорівнює 1,0. Це означає, що він взагалі не впливає на стійкість виробки. Досвід наукових досліджень в різних геологічних умовах показує, що стійкість виробки суттєво залежить від обраного типу ЗОВ. У разі застосування раціонального типу ЗОВ, розрахунки за формулою (1) доволі точно підтверджуються практикою. Але нормативні методики не містять рекомендацій стосовно вибору ЗОВ в залежності від гірничо-геологічних умов.

Експертні дослідження засновані на концепції адитивності початкових вимог при визначенні їх впливу на функцію корисності, а також адитивності критеріїв порівняння при виборі оптимального варіанта з ряду альтернативних рішень. Це дає можливість розрахувати константи взаємовпливу початкових вимог або критеріїв порівняння при вирішенні інженерних задач в умовах часткової відсутності інформації. Для вибору раціонального типу ЗОВ *функція корисності* сформульована наступним чином: при раціональних витратах на зведення засобу охорони, ризики зміщень покрівлі і підшви виробки повторного використання повинні бути мінімальними.

Порівняння різних типів ЗОВ, які на даний час найбільш широко використовуються в шахтах України, здійснювалося в полі початкових вимог, що виконують роль критеріїв порівняння (табл. 1). Оцінка питомої ваги впливу різних типів ЗОВ на функцію корисності проводилася із застосуванням матричного методу парних порівнянь.



Таблиця 1 – Критерії порівняння вагомості початкових вимог

Позначення початкової вимоги	Формулювання початкової вимоги
$d_c$	вартість зведення засобу охорони повинна бути мінімальна
$d_r$	ризик зміщень покрівлі виробки повинен бути мінімальним
$d_b$	ризик зміщень підосви виробки повинен бути мінімальним

На першому етапі здійснено експертну оцінку питомої ваги впливу критеріїв порівняння на функцію корисності. Тобто проведено розрахунок вагомості негативних наслідків від невиконання  $j$ -тої початкової вимоги. При такому методі, для кожної пари початкових вимог оцінюють відмінності з точки зору впливу на функцію корисності, допускаючи, що вони мають властивість адитивності. Далі отримані значення експертних оцінок підсумовують по рядках і рангують у вигляді спадної послідовності. З аналізу ряду спадаючих значень сумарних оцінок встановлено, що він апроксимується лінійною залежністю

$$I_{dj} = 0,73 - 0,2l_j, \quad (2)$$

де  $I_{dj}$  – вагомість негативних наслідків від невиконання  $j$ -тої початкової вимоги;  $l_j$  – ранг експертної оцінки впливу  $j$ -тої початкової вимоги на функцію корисності.

Таблиця 2 – Значення вагомості негативних наслідків від невиконання початкових вимог

Позначення початкової вимоги $d_j$	$d_c$	$d_r$	$d_b$	Ранг $l_j$	$I_{dj}$
$d_c$	■	0,1	0,4	3	0,13
$d_r$	0,9	■	0,8	1	0,53
$d_b$	0,6	0,2	■	2	0,33
Разом				-	0,99

Початкові вимоги реалізуються технічними можливостями ЗОВ. Ці можливості обумовлюються міцністними і деформаційними характеристиками ЗОВ, що застосовується, а також геологічними умовами розташування виробки.

Технологічними компонентами ЗОВ є типи охоронних смуг, а геологічними чинниками – умови розташування виробок (категорія обвалюваності покрівлі та міцність безпосередньої підосви виробки). Поєднання даних компонент і чинників дає можливість прийняття раціонального технічного рішення в умовах інформаційної невизначеності комплексної оцінки ризику деформування гірничих виробок. Технологічним компонентам і геологічним чинникам присвоєні кодові числа (табл. 3), що дозволяє в компактній формі представляти опис у вигляді шифру різних технологій і умов. Наприклад, шифр 0.10 відповідає застосуванню накатної смуги з дерев'яного кругляка в умовах безпосередньої підосви виробки

міцністю  $3 \leq f \leq 4$ . Схеми наведених в табл. 3 типів ЗОВ представлені на рис. 1.

Всі типи ЗОВ піддалися оцінці з точки зору їх технічних можливостей у забезпеченні кожної з початкових вимог  $d_j$  (див. табл. 1). Крок експертних оцінок становив 0,1 (таблиці тут не наведені). Чим вище здатність  $i$ -го типу охоронної смуги протидіяти зміщенням покрівлі або підосви в даних геологічних умовах, тим менше ймовірність деформування виробки. Ймовірність настання негативної події може приймати значення від «0» до «1». За «1» прийнято максимальну ймовірність деформування виробки, тобто при застосуванні типу ЗОВ з найнижчою сумою експертних оцінок  $S_{ri}$  або  $S_{bi}$ . Тому її розраховують за формулами:

$$P_{ri} = S_{r \min} / S_{ri} ; \quad (3)$$

$$P_{bi} = S_{b \min} / S_{bi} , \quad (4)$$

де  $P_{ri}$  і  $P_{bi}$  – ймовірність зміщень покрівлі або підосви гірничої виробки при застосуванні  $i$ -го типу ЗОВ, відповідно;  $S_{ri}$  і  $S_{bi}$  – сума експертних оцінок технічних можливостей  $i$ -го типу ЗОВ в забезпеченні виконання початкової вимоги  $d_r$  або  $d_b$ , відповідно (див. табл. 1);  $S_{r \min}$  і  $S_{b \min}$  – мінімальна сума експертних оцінок технічних можливостей ЗОВ в забезпеченні виконання початкової вимоги  $d_r$  або  $d_b$ , відповідно.

Таблиця 3 – Шифрування технологічних компонент і гірничо-геологічних чинників

Кодове число	Найменування компонент і чинників
	<u>Типи засобів охорони:</u>
0	накатна смуга з дерев'яного кругляка (рис. 1, а)
1	накатна смуга з дерев'яного бруса (рис. 1, а)
2	лита або пакетована смуга (рис. 1, b або c)
3	комбінована смуга із ділянок литої (або пакетованої) та накатної з кругляка смуг, що чергуються по довжині виробки (рис. 1, d)
4	комбінована смуга із ділянок литої (або пакетованої) та накатної з бруса смуг, що чергуються по довжині виробки (рис. 1, d)
5	подвійна смуга із паралельних уздовж виробки ділянок литої (або пакетованої) та накатної з кругляка смуг (рис. 1, e)
	<u>Гірничо-геологічні умови розташування виробок:</u>
6	легкообвалювана покрівля вугільного пласта (категорія $A_1$ )
7	середньообвалювана покрівля вугільного пласта (категорія $A_2$ )
8	важкообвалювана покрівля вугільного пласта (категорія $A_3$ )
9	міцність порід безпосередньої підосви виробки $f < 3$
10	міцність порід безпосередньої підосви виробки $3 \leq f \leq 4$
11	міцність порід безпосередньої підосви виробки $f > 4$

Таким чином, розраховано експертні оцінки  $I_{dj}$  (див. табл. 2) вагомості негативних наслідків від невиконання  $j$ -тої початкової вимоги та ймовірності  $P_{ri}$  і  $P_{bi}$ , відповідно, зміщень покрівлі або підосви гірничої виробки окремо для кожного з геологічних чинників. Ризик деформування гірничої виробки в

залежності від типу ЗОВ в різних геологічних умовах розраховують за формулою

$$R_i = P_{ri} \cdot I_{dr} + P_{bi} \cdot I_{db}, \quad (5)$$

де  $R_i$  – ризик деформування гірничої виробки при застосуванні  $i$ -го типу ЗОВ;  $I_{dr}$  та  $I_{db}$  – вагомість негативних наслідків від невиконання  $j$ -тої початкової вимоги (див. табл. 2).

Для вибору раціональних типів ЗОВ з урахуванням вартості (за цінами 2021 року), розраховано їх рейтинг  $T_i$  у спроможності виконання функції корисності: при раціональних витратах на зведення охоронної смуги, ризики зміщень покрівлі і підшви виробки повторного використання повинні бути мінімальними. Розраховані таблиці тут не наведені.

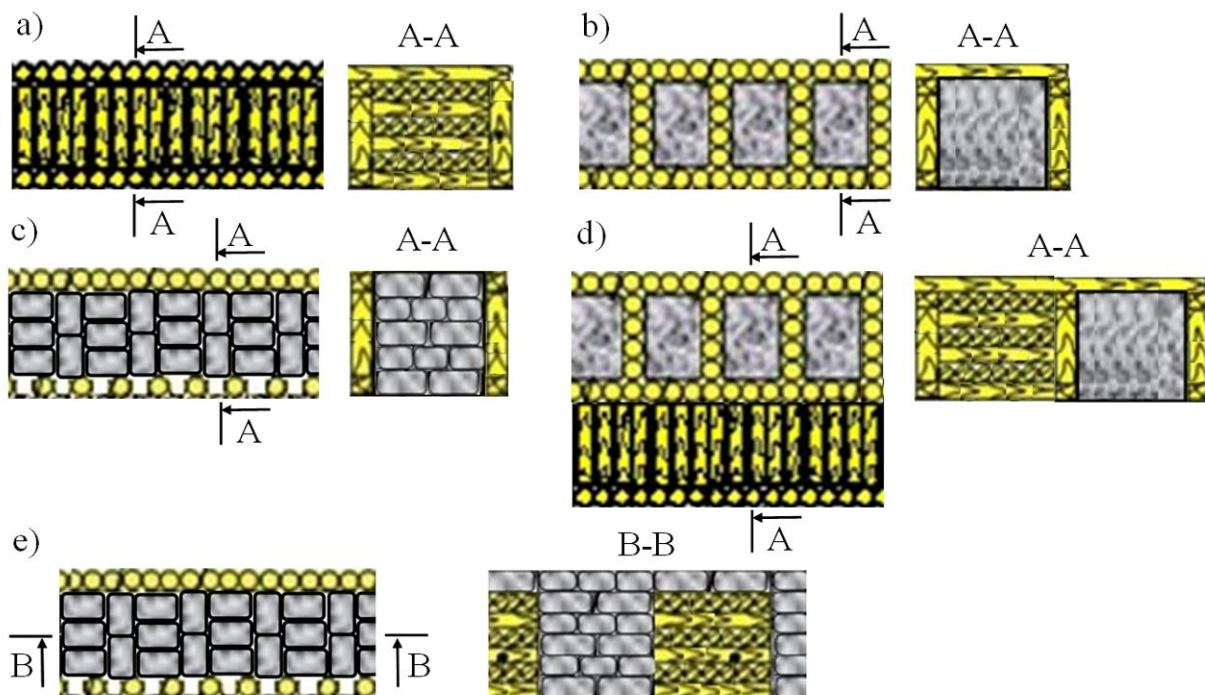


Рисунок 1 – Схематичне зображення засобів охорони дільничних виробок

$$T_i = A_{ci} \cdot I_{dc} + A_{ri} \cdot I_{dr} + A_{bi} \cdot I_{db}. \quad (6)$$

де  $A_{ci}$ ,  $A_{ri}$ ,  $A_{bi}$  – відносні індексовані оцінки технічних можливостей  $i$ -го типу ЗОВ в забезпеченні виконання початкових вимог  $d_c$ ;  $d_r$ ; і  $d_b$ , відповідно (див. табл. 1).

Остаточні результати розрахунків ризику деформування виробки та пріоритетності застосування того чи іншого типу ЗОВ в конкретних геологічних умовах наведені в табл. 4. Чим більше рейтинг ЗОВ, тим прийнятніше його використання в даних геологічних умовах. На практиці не завжди можна і доцільно обмежуватися одним варіантом без розгляду суміжних альтернативних. Тому по два альтернативних типи ЗОВ з найбільшими рейтингами було позначено якісною оцінкою «Р» – рекомендовані до застосування в даних умовах, «Н» – не рекомендовані, а останні якісною оцінкою «Д» – допустимі до застосування.

Використання даної таблиці дозволяє технологу гірничого підприємства здійснювати вибір раціонального типу ЗОВ в конкретних гірничо-геологічних умовах. При цьому буде враховано ризик втрати стійкості виробки з якісною оцінкою вартості спорудження альтернативних засобів її охорони.

Після вибору за табл. 4 типу ЗОВ, здійснюють розрахунок коефіцієнта  $K_o$  впливу даного засобу на стійкість дільничної виробки повторного використання. Цей коефіцієнт є складовою частиною формули (1) і залежить, насамперед, від наступних геологічних і технологічних параметрів: потужності  $m$  та кута нахилу  $\alpha$  вугільного пласта до горизонту; ширини засобу охорони  $b_{sw}$ . Крім того, коефіцієнт  $K_o$  повинен враховувати ризик деформування виробки при застосуванні вибраного типу ЗОВ в даних умовах.

Таблиця 4 – Ризик  $R_i$  деформування виробки та якісна оцінка рейтингу  $T_i$  різних типів ЗОВ при розташуванні виробки в умовах категорій обвалюваності покрівлі  $A_n$  та міцності порід підшви  $f$

Тип охоронної смуги		Гірничо-геологічні умови розташування виробки								
		$A_1$ та $f < 3$	$A_2$ та $f < 3$	$A_3$ та $f < 3$	$A_1$ та $3 \leq f \leq 4$	$A_2$ та $3 \leq f \leq 4$	$A_3$ та $3 \leq f \leq 4$	$A_1$ та $f > 4$	$A_2$ та $f > 4$	$A_3$ та $f > 4$
НС з кругляка	$R_i$	0,69	-	-	0,69	-	-	0,84	-	-
	$T_i$	(Д)	(Н)	(Н)	(Д)	(Н)	(Н)	(Д)	(Н)	(Н)
НС з брусу	$R_i$	0,63	0,74	-	0,61	0,71	-	0,69	0,71	-
	$T_i$	(Д)	(Д)	(Н)	(Д)	(Д)	(Н)	(Д)	(Д)	(Н)
ЛС або ПС	$R_i$	-	-	-	0,60	0,63	0,68	0,60	0,63	0,68
	$T_i$	(Н)	(Н)	(Н)	(Д)	(Д)	(Д)	(Д)	(Р)	(Р)
ЛС або ПС та НС з кругляка	$R_i$	0,50	0,60	0,72	0,48	0,58	0,71	0,54	0,58	0,77
	$T_i$	(Р)	(Р)	(Р)	(Р)	(Д)	(Д)	(Р)	(Д)	(Д)
ЛС або ПС та НС з брусу	$R_i$	0,61	0,67	0,75	0,49	0,55	0,63	0,54	0,55	0,69
	$T_i$	(Д)	(Д)	(Д)	(Р)	(Р)	(Р)	(Р)	(Р)	(Р)
Подвійна ЛС або ПС та НС	$R_i$	0,51	0,54	0,57	0,52	0,54	0,58	0,59	0,62	0,66
	$T_i$	(Р)	(Р)	(Р)	(Д)	(Р)	(Р)	(Д)	(Д)	(Д)

Шляхом апроксимації встановлено залежність коефіцієнта  $K_o$  від технологічних і геологічних чинників. Діапазон зміни параметрів знаходиться в наступних межах:  $m \in [1,0; 2,5]$ ,  $\alpha \in [0^0; 30^0]$ ,  $b_c \in [1,0; 3,0]$ ,  $R_i \in [0,48; 0,84]$ . За результатами отримана формула для розрахунку коефіцієнта  $K_o$

$$K_o = 0,176m/d + 1,4R_i - 0,105b_{sw}/d + 0,17tg\alpha, \quad (7)$$

де  $d$  – мінімальний діаметр стійок органного кріплення, прийнятий 0,15 м.

Значення ризику  $R_i$  деформування виробки встановлюють за даними табл. 4.

З урахуванням (1) і (7) отримуємо остаточну формулу для розрахунку сумарного зміщення покрівлі та підшви виробки при її підтриманні після проходження першої лави

$$U = 0,002 \cdot H \cdot K_y \cdot K_s \cdot (0,176m/d + 1,4R_i - 0,105b_{sw}/d + 0,17tg\alpha). \quad (8)$$

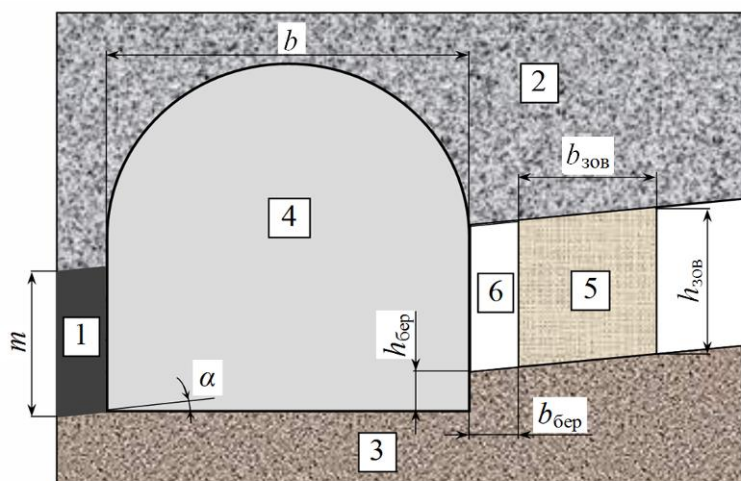
Зіставлення результатів розрахунків зміщень виробки  $U$  за цією

формулою з отриманими по методиці, дає розбіжності не більше 12,0 %.

**В третьому розділі** обґрунтовано вибір технології і матеріалу для фізичного моделювання стійкості виробок, здійснено математичне моделювання течії матеріалу крізь екструдер 3D-принтера, розроблено конструкцію екструдера нового типу.

Моделювання на еквівалентних матеріалах дозволяє простежити розвиток геомеханічних процесів у товщі порід, детально дослідити механізми деформування та руйнування кріплення та засобів охорони гірничих виробок. При цьому слід дотримуватися геометричної та механічної подоби моделей натурі. Однак, фізичні моделі з еквівалентних матеріалів виготовляються вручну. Це обумовлює високу трудомісткість побудови складних моделей, а також низьку точність дотримання геометричних розмірів і складу окремих елементів моделі, які виготовляються з різних матеріалів, що вносить суттєву похибку в кінцеві результати досліджень. Усунути перелічені недоліки методу фізичного моделювання здатна автоматизація процесу виготовлення моделей з еквівалентних матеріалів за технологією 3D-друку.

Схема фізичної моделі гірського масиву, дільничної виробки і засобу її охорони наведена на рис. 4. В цій моделі застосовується шість матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, що дозволить варіювати геологічними умовами розташування виробки – міцністю і кутом нахилу вугільного пласта та порід його покрівлі і підшви. Також є можливість відпрацьовувати різні технологічні рішення – змінювати опір і піддатливість рамного кріплення та засобу охорони виробки, варіювати місцем розташування засобу охорони і його геометричними розмірами.

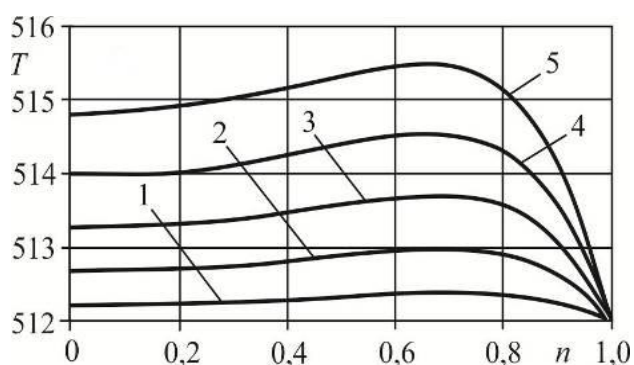


1 – вугільний пласт; 2, 3 – породи покрівлі і підшви вугільного пласта, відповідно; 4 – гірничі виробки; 5 – засіб охорони виробки; 6 – вироблений простір лави;  $b$  – ширина виробки;  $m$ ,  $\alpha$  – потужність і кут нахилу вугільного пласта, відповідно;  $h_{зоб}$ ,  $b_{зоб}$  – висота і ширина засобу охорони виробки, відповідно;  $h_{бер}$ ,  $b_{бер}$  – висота і ширина берми, відповідно

Рисунок 4 – Схема фізичної моделі гірського масиву, дільничної виробки і засобу її охорони

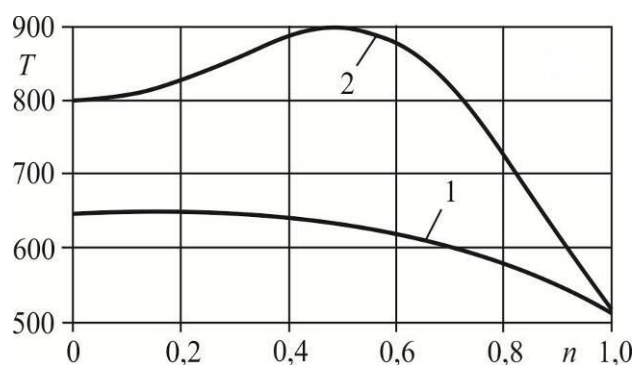
Для визначення параметрів і режимів роботи екструдера 3D-принтера була розроблена математична модель течії пластичного середовища з урахуванням процесів теплообміну зі стінкою каналу, що нагрівається (рис. 5). Вирішення системи рівнянь було отримано методом смуг, що дозволило для матеріалів двох видів дослідити поля швидкостей та температури, й, надалі вибрати параметри 3D-принтера для фізичного моделювання. За допомогою екструзійного 3D-друку були виготовлені кубічні зразки із декількох видів пластику. Результати їх випробувань вказують на необхідність використання поліматеріалів на основі пластику та сипучих середовищ. Вони мають широкий діапазон фізико-механічних властивостей, є можливість керування в'язкістю матеріалу і часом його твердіння. Для роботи з такими матеріалами було сконструйовано і подано заявку на патент екструдера нового типу.

Профілі температур у перерізі на виході для матеріалу  $\alpha \neq 0$



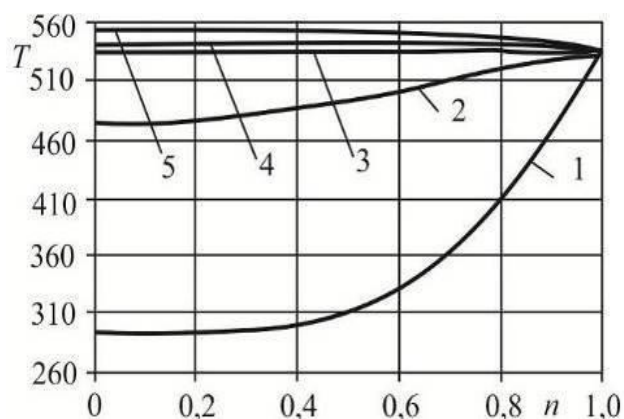
1 –  $U_C = 0,001$  м/с; 2 –  $U_C = 0,002$  м/с;  
3 –  $U_C = 0,003$  м/с; 4 –  $U_C = 0,004$  м/с;  
5 –  $U_C = 0,005$  м/с

Профілі температур у перерізі на виході для матеріалу  $\alpha = 0$  (ПЕТФ)



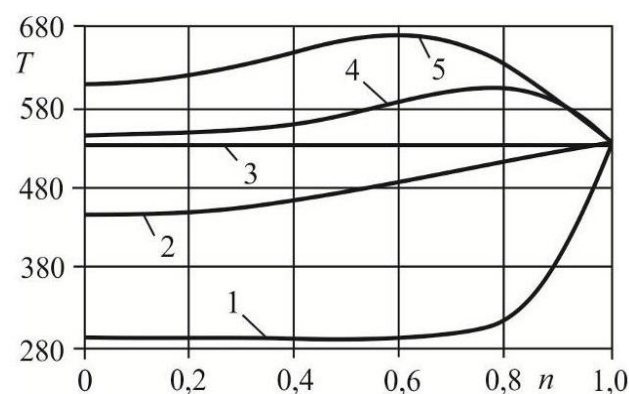
1 –  $U_C = 0,001$  м/с; 2 –  $U_C = 0,002$  м/с

Профілі температур у перетинах каналу при течії ППС,  $U_C = 0,001$  м/с



1 –  $\zeta_1 = 0,002$ ; 2 –  $\zeta_2 = 0,02$ ; 3 –  $\zeta_3 = 0,85$ ;  
4 –  $\zeta_4 = 0,95$ ; 5 –  $\zeta_5 = 1$

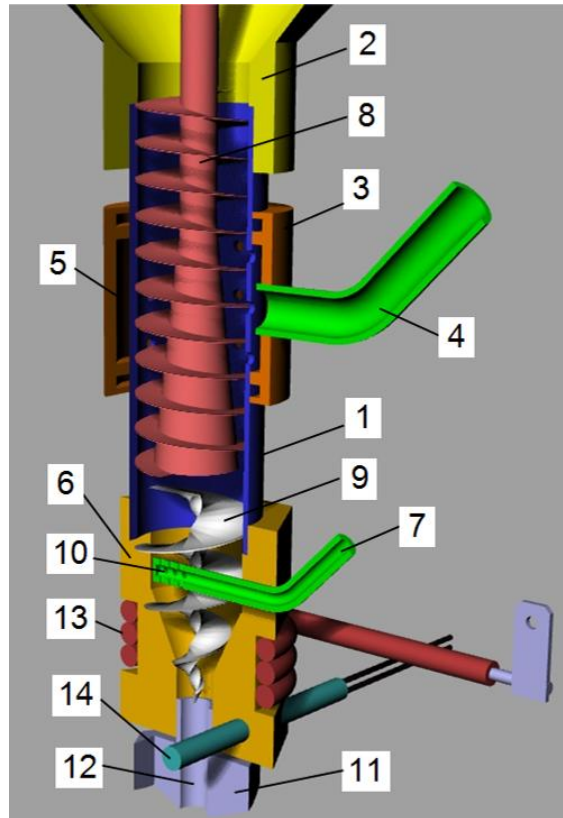
Профілі температур у перетинах каналу при течії ППС,  $U_C = 0,005$  м/с



1 –  $\zeta_1 = 0,002$ ; 2 –  $\zeta_2 = 0,02$ ;  
3 –  $\zeta_3 = 0,85$ ; 4 –  $\zeta_4 = 0,95$ ; 5 –  $\zeta_5 = 1$

Рисунок 5 – Результати моделювання течії матеріалу крізь екструдер

Конструкція (рис. 6) дозволяє автоматизувати процес виготовлення еквівалентної суміші безпосередньо в корпусі екструдера, розширити його функціональні можливості за рахунок диференційованої подачі декількох компонентів, що, в свою чергу, дозволяє керувати фізичними властивостями окремих елементів моделі гірського масиву і виробки.



1 – корпус екструдера, 2 – вузол подачі сухої суміші, 3 – вузол подачі рідкого полімерного сполучного, 4 – штуцер подачі рідкого полімерного сполучного, 5 – порожнина, 6 – вузол подачі затверджувача, 7 – штуцер подачі затверджувача, 8 – шнек-дозатор, 9 – змішувач у вигляді нерухомого шнека, 10 – форсунки подачі затверджувача, 11 – сопло (друкарська головка), 12 – вихідний отвір для суміші, що екструдується, 13 – блок нагріву суміші, 14 – термодатчик контролю температури суміші

Рисунок 6 – Конструкція екструдера еквівалентних сумішей для 3D друку моделі гірського масиву і виробки

**В четвертому розділі** вдосконалено методику розрахунку міцності бетонних охоронних смуг шляхом врахування часу їх твердіння та факторів, що утворюють шахтні умови спорудження і експлуатації ЗОВ. Наведено результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану (НДС) ЗОВ в залежності від категорії обвалюваності покрівлі вугільного пласта.

Тиск підробленої покрівлі вугільного пласта на ЗОВ зростає з часом, у міру віддалення вибою лави. Тому для обґрунтування відповідності обраної цементно-мінеральної суміші геологічним умовам розташування виробки при розрахунку параметрів литої або пакетованої смуг важливо враховувати

інтенсивність твердіння бетону в часі. Тобто відповідність набору міцності бетоном очікуваним навантаженням.

При оцінюванні несучої здатності бетонних ЗОВ користуються значеннями міцності бетону, отриманими за стандартними випробуваннями його зразків в лабораторних умовах. При цьому піддають одноосьовому стиску зразки з гладкими, паралельними поверхнями. Однак в шахтних умовах ці вимоги не дотримуються. Поверхні ЗОВ і підроблених порід мають нерівності, які концентрують напруження в окремих точках бетонної смуги, що знижує її несучу здатність. На зміцнення бетону в часі впливає температура шахтного середовища і хімічний склад шахтної води, яка використовується для розчину суміші.

В лабораторних умовах, у разі використання в суміші портландцементів при температурі навколишнього середовища  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , міцність бетону на стиск у будь-який момент часу твердіння  $\tau$  визначають за його міцністю в віці  $\tau = 28$  діб ( $R_{(28)}$ ), використовуючи формулу Б.Г. Скрамтаєва

$$R_{(\tau)} = R_{(28)} \cdot \lg \tau / \lg 28, \quad (9)$$

З врахуванням факторів, що утворюють шахтні умови спорудження і експлуатації бетонних охоронних смуг, формула (10) набуває вигляд

$$R_{\text{bc}(\tau)} = k_{\text{стр}} \cdot k_{\text{рел}} \cdot k_{\text{ш.в.}} \cdot k_m \cdot R_{(28)} \cdot \lg(\tau \cdot k_t) / \lg 28, \quad (10)$$

де  $R_{\text{bc}(\tau)}$  – межа міцності бетонної смуги на одноосьовий стиск на момент часу  $\tau$ ;  $k_{\text{стр}}$  – коефіцієнт ослаблення бетонної смуги під впливом її структури, для литої смуги (ЛС)  $k_{\text{стр}} = 1$ , а для пакетованої смуги (ПС)  $k_{\text{стр}} = 0,7$ , що обумовлено неправильною геометричною формою пакетів з сумішшю, які формують її структуру;  $k_{\text{рел}}$  – коефіцієнт ослаблення бетонної смуги під впливом нерівностей рельєфу підроблених і надроблених порід, для ЛС  $k_{\text{рел}} = 0,7$  для ПС  $k_{\text{рел}} = 1,0$ ;  $k_{\text{ш.в.}}$  – коефіцієнт впливу агресивності шахтних вод на міцність бетону  $0,83 < k_{\text{ш.в.}} < 0,93$ , при відсутності даних про хімічний склад води, приймають  $k_{\text{ш.в.}} = 0,9$ ;  $k_m$  – коефіцієнт впливу потужності вугільного пласта, який встановлюють за емпіричною залежністю  $k_m = 1,22 - 0,22m$ ;  $k_t$  – коефіцієнт впливу температури шахтного середовища на інтенсивність набору міцності бетоном в період часу  $3 < \tau \leq 28$ , діб

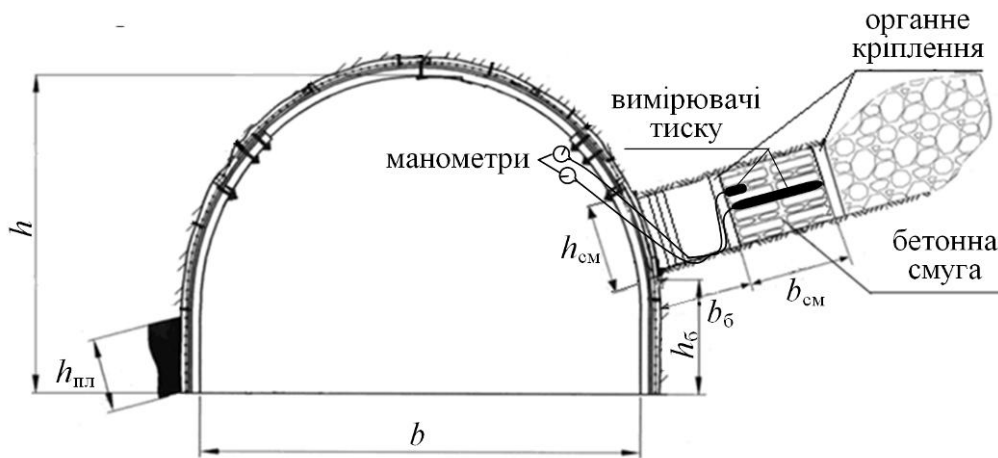
$$k_t = 0,25e^{0,07t}, \quad (11)$$

де  $t$  – температура шахтного середовища, допустима температура в гірничих виробках становить  $23^{\circ}\text{C} \leq t \leq 26^{\circ}\text{C}$ , тому  $1,24 \leq k_t \leq 1,52$ .

В вугільних шахтах ДП «Львіввугілля» проведені експериментальні дослідження, метою яких було розкриття механізму і встановлення закономірностей навантаження і деформування засобів ЗОВ із швидкотвердіючої суміші в залежності від часу її твердіння і відстані до вибою лави для обґрунтування параметрів ЗОВ і властивостей суміші в різних геологічних умовах.



Тиск порід підробленої покрівлі на бетонну смугу вимірювали спеціальними гідравлічними пристроями, які склалися з металевих ємностей, заповнених маслом і обладнаних високонапірним шлангом з манометром (рис. 7). При спорудженні смуги, під час укладання пакетів з сухою сумішшю, ці пристрої розміщували під останнім верхнім шаром пакетів. Вимірювання тиску порід здійснювали на різних відстанях від контуру виробки, що дозволило дослідити механізм і закономірності його розподілу по ширині смуги. Також, під час спорудження смуги, на її верхній і нижній межі встановлювали репери, за відстанню між якими вимірювали деформацію смуги з прив'язкою до часу і положення вибою лави. НДС бетонної смуги оцінювали за критерієм її відносної вертикальної деформації під тиском порід підробленої покрівлі на різних часових стадіях твердіння бетону.



$h$  і  $b$  – висота і ширина виробки, відповідно;  $h_{см}$  і  $b_{см}$  – висота і ширина бетонної смуги, відповідно;  $h_б$  і  $b_б$  – висота і ширина берми, відповідно;  $h_{пл}$  – потужність вугільного пласта

Рисунок 7 – Схема вимірювальної станції

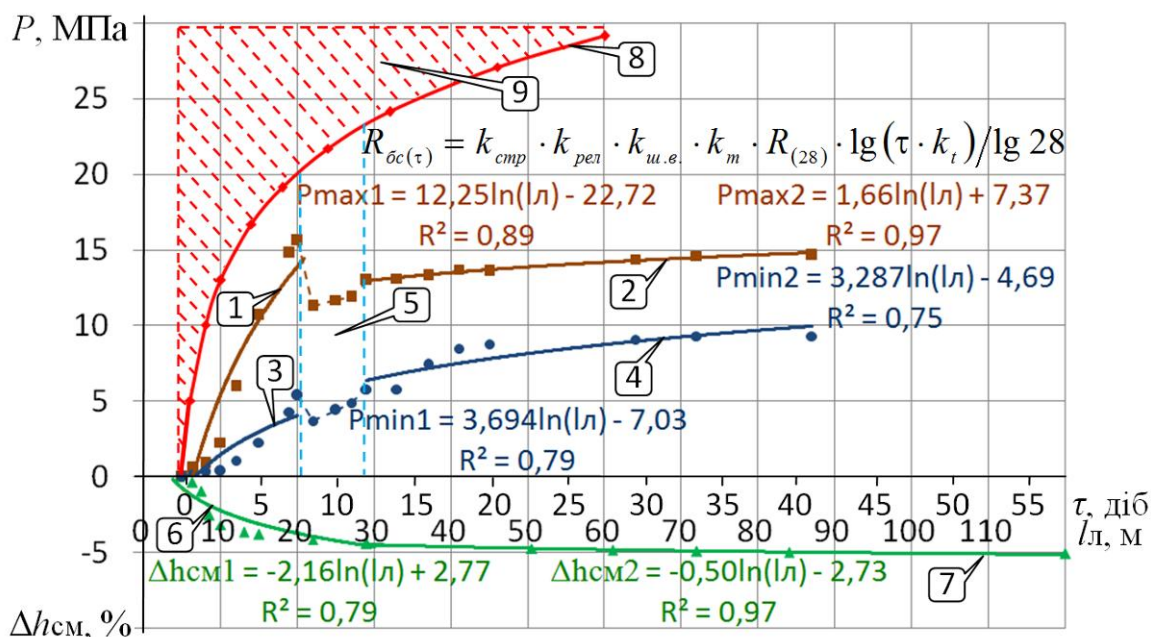
Результати досліджень стану пакетованої смуги при важко- (А3) і середньообвалюваній (А2) покрівлі представлено на рис. 8. В перший період, в інтервалі  $l_д = 4-20$  м за вибоєм лави, зростання тиску на бетон має інтенсивний характер (рис. 8, криві 1 і 3). При цьому тиск на дальню від дільничної виробки частину бетонної смуги (з боку виробленого простору лави) в 4-5 разів вище, ніж тиск на її ближню частину. Це обумовлено стаціонарним опорним тиском від консолі підроблених порід, яка зависає над виробленим простором лави і спирається на ЗОВ. У цей період відносна вертикальна деформація смуги  $\Delta h_{см}$  інтенсифікується за логарифмічною залежністю (рис. 8, крива 6).

При подальшому віддаленні вибою лави відбувається обвал консолі підробленої покрівлі вугільного пласта, тиск на бетонну смугу зменшується і перерозподіляється більш рівномірно по всій її ширині (рис. 8, криві 2 і 4). Внаслідок цього відносна вертикальна деформація смуги  $\Delta h_{см}$  стабілізується за логарифмічною залежністю (рис. 8, крива 7). За весь період спостережень  $\Delta h_{см}$  не перевищила 13 %. Основна частина деформування (понад 80%) відбувається у початковий період віддалення вибою лави (від 4 до 20 м).

Критерієм оцінки стійкості литих або пакетованих смуг є відповідність між швидкістю набору міцності бетоном  $R_{\text{bc}(\tau)}$  (рис. 8, крива 8) і зростанням тиску  $P_{\text{max}}$  на нього (рис. 8, криві 1, 2) – в нормальному режимі

$$R_{\text{bc}(\tau)} / g \geq P_{\text{max}}, \quad (12)$$

де  $g$  – коефіцієнт надійності, для бетонних конструкцій з середньою густиною понад  $1600 \text{ кг/м}^3$ ,  $g = 1,1$ .



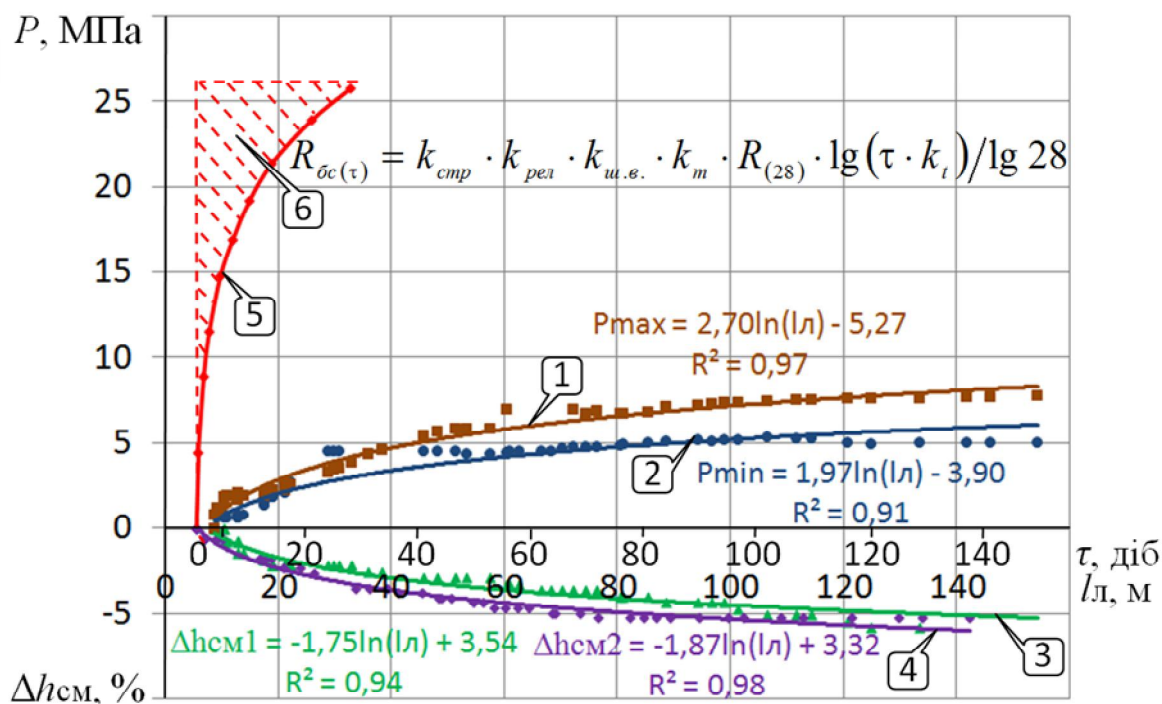
1, 2 – максимальний тиск  $P_{\text{max}}$  (МПа) на бетонну смугу, відповідно до і після обвалення покрівлі; 3, 4 – мінімальний тиск  $P$  (МПа) на бетонну смугу, відповідно до і після обвалення покрівлі; 5 – період стабілізації тиску після обвалення покрівлі; 6, 7 – відносна вертикальна деформація  $\Delta h_{\text{cm}}$  (%) бетонної смуги, відповідно до і після обвалення покрівлі; 8 – межа міцності бетонної смуги на стиск  $R_{\text{bc}(\tau)}$  (МПа) у відповідний проміжок часу  $\tau$ , діб; 9 – зона руйнівного для бетонної смуги тиску

Рисунок 8 – Залежність напружено-деформованого стану (НДС) бетонної смуги від часу твердіння бетону і відстані до вибою лави при важко- і середньообвалюваній покрівлі

Таким чином, в умовах категорій покрівлі А2-А3, зростання межі міцності бетонної смуги на стиск  $R_{\text{bc}(\tau)}$  на 25-50 % випереджало ріст тиску  $P_{\text{max}}$  на смугу в будь-який проміжок часу  $\tau$  (рис. 8, криві 1, 2 і 8).

Результати досліджень в умовах легкообвалюваної покрівлі (категорія А1) представлено на рис. 9. На відміну від умов категорій А2 і А3 (див. рис. 8), зростання і стабілізація тиску на бетонну смугу та її відносна вертикальна деформація відбуваються більш рівномірно в часі і просторі, за логарифмічними залежностями. Це пояснюється відсутністю впливу шагу обвалення покрівлі. При цьому також простежуються два етапи навантаження і деформування смуги: спочатку більш інтенсивний, а після віддалення лави – повільний.

Таким чином, в умовах легкообвалюваної покрівлі (категорія А1) в будь-який проміжок часу  $\tau$  зростання межі міцності бетонної смуги на стиск  $R_{bc(\tau)}$  не менш ніж в 5 разів випереджало ріст тиску  $P_{max}$  на смугу (рис. 9, криві 1 і 5). Тому, з метою економії коштів, були розроблені і застосовані зміни в паспорт кріплення виробки. Було зменшено ширину бетонної смуги, а також використана комбінована смуга із ділянок бетонної та накатної з бруса смуг, що чергуються по довжині виробки (рис. 9, крива 4).



1, 2 – відповідно максимальний і мінімальний тиск  $P$  (МПа) на бетонну смугу;  
3, 4 – відносна вертикальна деформація  $\Delta h_{см}$  (%) різних типів засобу охорони, відповідно пакетованої і комбінованої смуг; 5 – межа міцності бетонної смуги на стиск  $R_{bc(\tau)}$  (МПа) у відповідний проміжок часу  $\tau$ , діб; 6 – зона руйнівного для бетонної смуги тиску

Рисунок 9 – Залежність НДС бетонної смуги від часу твердіння бетону і відстані до вибою лави при легкообвалюваній покрівлі

При покрівлі А1 тиск на ЗОВ менше, ніж при покрівлях А2 і А3, але швидкість його зростання в часі – більша. Тому ділянки накатної з бруса смуги, сприймаючи на себе тиск у початковий час, дають бетону на ділянках з пакетованою смугою час затвердіти в умовах неруйнівного тиску (12). Через те відносна вертикальна деформація комбінованої смуги  $\Delta h_{см}$  дещо менша, ніж деформація бетонної смуги (при меншій вартості) і також підкоряється логарифмічній залежності (рис. 9, крива 3).

Впровадження у виробництво рекомендацій щодо параметрів і технології спорудження ЗОВ в умовах шахт «Червоноградська» та «Лісова» ДП «Львіввугілля» дозволило зменшити витрати цементно-мінеральної суміші на 27 % та зберегти конвеєрні штреки № 562 і № 166 для повторного використання в якості вентиляційних при відпрацюванні суміжного виїмкового стовпа.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій із застосуванням положень теорії ризиків, вирішене актуальне наукове завдання, яке полягає у встановленні закономірностей зміни тиску підробленої покрівлі на засоби охорони виробок з рідкого бетону в часі, що дозволило розробити ризикорієнтовані методики обґрунтування раціональних типів цих засобів для різних категорій стійкості покрівлі і підшви вугільного пласта та розрахунку параметрів бетону – межі міцності на стиск і швидкості її зростання, застосування яких забезпечує повторне використання дільничних виробок вугільних шахт.

1. Критеріями доцільності використання різних типів засобів охорони виробок в залежності від геологічних умов є їх відповідність функції корисності: при раціональних витратах на зведення засобу охорони, ризики зміщень покрівлі і підшви виробки повинні бути мінімальними. Зі збільшенням суми експертних оцінок ймовірність деформування виробки знижується, а рейтинг засобу її охорони зростає за лінійними залежностями. Питома вага негативних наслідків від невиконання початкових вимог складає: вартість зведення засобу охорони – 0,13, ризик зміщень покрівлі виробки – 0,53, підшви – 0,33.

2. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що тиск підробленої покрівлі вугільного пласта та відносна вертикальна деформація засобу охорони дільничної виробки зростають за логарифмічними залежностями від відстані до вибою лави і часу твердіння бетону. При важко- і середньообвалюваній покрівлі ці процеси поділяються на два етапи: на першому етапі (протяжність якого відповідає кроку обвалення покрівлі), у міру посування лави, тиск інтенсивно зростає, в момент обвалення падає на 15-20%, а на другому етапі знов зростає, але в 6-8 разів повільніше, ніж на першому, та, за умови стабілізації відносної вертикальної деформації засобу охорони, переходить в сталий режим. При легкообвалюваній покрівлі крок її обвалення не має істотного впливу на зростання і стабілізацію напружено-деформованого стану засобу охорони.

3. Розроблена математична модель течії пластичного матеріалу крізь канал екструдеру 3-D принтеру з урахуванням особливостей реологічної поведінки непружних рідких середовищ, та методика розрахунку параметрів такої течії методом смуг, що дозволило визначити вплив температури стінки екструдеру та швидкості подавання матеріалу в насадок на розподіл швидкості та температури течії полімеру по радіусу каналу в різних його перерізах.

4. Розроблені науково-методичні основи застосування екструзійної технології створення складних фізичних моделей гірського масиву і виробки. Автоматизація цього процесу забезпечує виготовлення еквівалентної суміші безпосередньо в корпусі екструдера та розширює його функціональні можливості за рахунок диференційованої подачі декількох компонентів, що забезпечує високу точність геометричних розмірів та дозування матеріалів моделей.

5. Розроблено і узгоджено з ДП «Львіввугілля» ризикорієнтовану методику вибору раціонального типу засобу охорони дільничних виробок, яка враховує геологічні умови розташування виробки (категорію обвалюваності покрівлі і міцність підшви виробки) та вартість зведення засобів охорони, а також методику розрахунку їх параметрів, яка дозволяє для різних гірничо-геологічних умов визначати максимально допустиму швидкість посування очисного вибою при існуючих параметрах охорони виробки, або коригувати ці параметри при заданій швидкості посування лави.

6. Впровадження у виробництво рекомендацій щодо параметрів і технології спорудження засобів охорони виробок в шахтах «Червоноградська» та «Лісова» ДП «Львіввугілля» дозволило зменшити витрати цементно-мінеральної суміші на 27 % та зберегти конвеєрні штреки № 562 і № 166 для повторного використання в якості вентиляційних при відпрацюванні суміжного виїмкового стовпа. Отримані в дисертації результати увійшли до нормативного документу України «Інструкція щодо забезпечення стійкості дільничних виробок для повторного використання на вугільних шахтах».

## **ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:**

### *Статті в наукових фахових та закордонних виданнях*

1. Круковський О.П., Курносів С.А., Макеєв С.Ю., Стадничук М.М. Визначення надійності засобів кріплення гірничих виробок з урахуванням ризику їх деформування. *Проблеми міцності*. 2023. №3. С. 26-36.

2. Hennadii Symanovych, Mykola Odnovol, Valerii Yakovenko, Roman Sachko, Iryna Shaikhlislamova, Tetiana Reshetilova, and Mykola Stadnichuk. Assessing the geomechanical state of the main working network state in the case of undermining in the conditions of weak rocks. *Mining of Mineral Deposits*. Volume 17 (2023), Issue 2, p.p. 91-98. <https://doi.org/10.33271/mining17.02.091>

3. Булат, А.Ф. Обоснование методов контроля геомеханической безопасности на горных предприятиях / А.Ф. Булат, И.Н. Слащев, М.М. Стадничук [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2020. – Вып. 150. – С. 176-187.

4. Stadnichuk M.M., Krukovskyi O.P., Kurnosov S.A., Makeiev S. Yu. and Semenyuk M.I. Calculation of parameters of the protection means for roadway districts in which cement-mineral mixtures are used. *Geo-Technical Mechanics: Journal of Collected Scientific Papers*. Dnipro, 2022. Issue 163. P. 121-129.

5. Круковський О.П., Курносів С.А., Макеєв С.Ю., Стадничук М.М. Розрахунок міцності бетонних литої і пакетованої охоронних смуг. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро, 2023. № 72. С. 53-61.

### *Основні публікації в матеріалах конференцій*

6. Стадничук М.М., Курносів С.А., Макеєв С.Ю. Шляхи підвищення продуктивності вугільних шахт. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ:*

матеріали XX міжнародної конференції молодих вчених, м. Дніпро, 27 жовтня 2022 р. ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України, 2022. С. 149-152, (очна участь).

7. Stadnychuk M.M., Kurnosov S.A., Makeiev S.Yu. Justification of the conformity of the quick-setting mixture parameters to the conditions of using safety means for the district workings. *Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2023: Materiały Konferencyjne*, Kraków, 27.02–1.03.2023. Kraków: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, 2023. P. 632-636, (заочна участь).

#### *Патенти*

8. Патент України №114787, МПК F16C 11/06, B41F 17/00. Пристрій для об'ємного друку / А.Ф. Булат, Ю.Л. Звягільський, В.С. Возіанов, М.М Стаднічук; опубл. 27.03.2017, Бюл. 6.

9. Патент України № 124376, МПК B41J 2/00, G02B 26/12, H04N 1/113. Пристрій для лазерного тривимірного друку / А.Ф. Булат, В.С. Возіанов, М.М Стаднічук, О.І. Волошин, Д.І. Губенко, І.В. Кутимов; опубл. 10.04.2018, Бюл. 7.

10. Патент України №137239, МПК B41J 2/00, G02B 26/12, H04N 1/113. Пристрій для тривимірного друку / А.Ф. Булат, В.С. Возіанов, М.М Стаднічук, О.І. Волошин, Д.І. Губенко, І.В. Кутимов; опубл. 10.10.2019, Бюл. 19.

*Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

11. Булат, А.Ф. Течія неньютонівської рідини в екструзійному апараті для тривимірного друку / А.Ф. Булат, В.И. Елисеєв, Е.В. Семененко, Н.Н. Стадничук, Б.А. Блюсс // Допов. Нац. акад. наук Укр. 2021, № 5. – С. 25-32. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.05.025>.

12. Булат, А.Ф. Особливості використання малов'язкого ньютонівського середовища в екструзійному апараті для тривимірного друку / А.Ф. Булат, В.И. Елисеєв, Е.В. Семененко, Н.Н. Стадничук, Б.А. Блюсс // Допов. Нац. акад. наук Укр. 2021. № 6. С. 23-31. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.06.023>.

#### **ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК АВТОРА В РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ В СПІВАВТОРСТВІ:**

[1, 5, 6] – дослідження геомеханічних факторів, що утворюють ризик аварій на гірничому підприємстві; [2, 4, 7] – розробка методики розрахунку параметрів засобів охорони і ізоляції дільничних виробок з урахуванням ризикоутворюючих факторів; [3] – розробка методики досліджень та програми для автоматичного розрахунку вибору типу засобів охорони гірничих виробок; [8-10] – розробка пристроїв для об'ємного друку, здатних створювати фізичні моделі гірського масиву і виробки; [11, 12] – побудова математичної моделі розрахунку течії в'язких рідин в екструзійному апараті.

## АНОТАЦІЯ

Стаднічук М.М. Обґрунтування параметрів та умов застосування засобів охорони дільничних виробок вугільних шахт. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка». – Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, 2023.

Захищаються встановлені закономірності тиску підробленої покрівлі вугільного пласта на засіб охорони виробки, які дозволили обґрунтувати його раціональні типи і параметри із застосуванням положень теорії ризиків та забезпечити повторне використання дільничних виробок вугільних шахт.

Отримано нову формулу для розрахунку коефіцієнта впливу типу засобу охорони на зміщення дільничних виробок, яка враховує ризик деформування виробки, потужність і кут нахилу вугільного пласта до горизонту та конструктивні параметри засобу охорони – його ширину та місце розташування відносно виробки.

Розкрито механізм і встановлені закономірності навантаження і деформування засобів охорони дільничних виробок із швидкотвердіючої суміші в залежності від часу її твердіння і відстані до вибою лави, з врахуванням категорії стійкості покрівлі вугільного пласта.

Розроблені науково-методичні основи застосування технології 3D-друку для створення складних фізичних моделей гірського масиву і виробки. Автоматизація цього процесу забезпечує високу точність геометричних розмірів та дозування матеріалів моделей, що суттєво зменшує похибку кінцевих результатів лабораторних випробувань.

Впровадження у виробництво рекомендацій щодо параметрів і технології спорудження засобів охорони виробок в шахтах «Червоноградська» та «Лісова» ДП «Львіввугілля» дозволило зменшити витрати цементно-мінеральної суміші на 27 % та зберегти конвеєрні штреки №562 і №166 для повторного використання в якості вентиляційних при відпрацюванні суміжного виїмкового стовпа. Отримані в дисертації результати увійшли до нормативного документу України «Інструкція щодо забезпечення стійкості дільничних виробок для повторного використання на вугільних шахтах».

Ключові слова: стійкість гірничих виробок, засоби охорони виробок, напружено-деформований стан, технологія 3D-друку фізичних моделей.

## ABSTRACT

Stadnichuk M.M. Justification of the parameters and conditions for the use of roadway district protection means in coal mines. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.15.09 - "Geotechnical and Mining Mechanics". - M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2023.

The established pattern of pressure of undermined coal seam roof on the means of roadway protection are defended, which made it possible to substantiate rational types and parameters of the protection means based on the provisions of the theory of

risks and to ensure the reuse of roadway districts in coal mines.

A new formula is obtained for calculating the coefficient of the influence of the type of protection means on the roadway districts displacement, which takes into account the risk of the roadway deformation, the coal seam thickness and the angle of its inclination to the horizon and the design parameters of the protection means - its width and location relative to roadway.

A mechanism is disclosed and patterns of loading and deformation of roadway district protection means made of a quick-hardening mixture are established depending on the time of its hardening and the distance to the longwall face with taking into account the category of the coal seam roof stability.

The scientific and methodological basics are developed for using the 3D printing technology to create complex physical models of the rock massif and roadway. Automation of this process ensures high accuracy of geometric dimensions and dosing of model materials, which significantly reduces the error of the end results of laboratory tests.

The implementation into production of the recommendations on parameters and technologies for constructing roadway protection means in "Chervonogradska" and "Lisova" mines of the state enterprise "Lvivvugillia" made it possible to reduce the costs of the cement-mineral mixture by 27% and preserve the belt roadways No. 562 and No. 166 for reuse as air roadways while mining the adjacent panel. The results obtained in the dissertation were included in the normative document of Ukraine "Instructions on ensuring the stability of roadway districts for reuse in coal mines".

Keywords: stability of roadway districts, means of roadway protection, stressed-deformed state, technology of 3D printing of physical models.



Стаднічук Микола Миколайович

ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ  
ЗАСОБІВ ОХОРОНИ ДІЛЬНИЧНИХ ВИРОБОК ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

(Автореферат)

Підписано до друку 09.08.2023 р.

Формат А5 Папір офсетний.

Друк ризографічний. 1,1 умов. друк. арк.

Тираж 100 прим. Замовлення № 571

Віддруковано в ТОВ «Барвікс»

Свідоцтво при внесення до державного реєстру

ДП № 24 від 25.07.2000 р.

49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 17