

ДВНЗ «Донецький Національний Технічний Університет»
(повне найменування вищого навчального закладу)

«Гірничий факультет»
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра «Розробка родовищ корисних копалин»
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____/Єфремов І.О./
“ ” _____ 2023_року

Випускна кваліфікаційна робота

магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Вибір способу боротьби з підняттям підшви гірничих виробок і об-
ґрунтування його параметрів в умовах пл. д₄ бл.10 ПРАТ ш/у Покровсь-
ке»

Виконала: студентка 2 курсу, групи РРКМ-22

напряму підготовки (спеціальності) 184 «Гірництво», спеціалізація «Розробка
родовищ корисних копалин»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Васильцова А.О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник проф. каф. РРКК, д.т.н., Сахно І.Г.

(посада, наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць ін-
ших авторів без відповідних посилань.
Студентка Васильцова А.О. _____
(підпис)*

Луцьк – 2023 р

ДВНЗ «Донецький Національний Технічний Університет»

Факультет Гірничий факультет

Кафедра Розробка родовищ корисних копалин

Освітньо-кваліфікаційний рівень (освітній ступінь) магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 184 «Гірництво»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

/Єфремов І.О./

“ ” 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРУ

Васильцова Анастасія Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Вибір способу боротьби з підняттям підосви гірничих виробок і обґрунтування його параметрів в умовах пл. д₄ бл.10 ПРАТ ш/у Покровське»

керівник роботи Сахно Іван Георгійович, д.т.н., проф

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом № від “ ” 2023 року

2. Строк подання студентом роботи 15 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи матеріали, які зібрані на ПРАТ ш/у Покровське під час проходження переддипломної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: загальна характеристика ПРАТ ш/у Покровське, аналіз стану технології прохідницьких робіт і кріплення штреків, аналіз літературних джерел щодо способів боротьби з підняттям підосви, вибір способу боротьби з підняттям підосви і обґрунтування його параметрів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): геологічний прогноз, паспорт проведення і кріплення штреку, паспорт ремонту штреку, способи боротьби з підняттям підосви в штреці, результати математичного моделювання

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ПРАТ «Ш/У ПОКРОВСЬКЕ»	05.10.2023	
2	ОПИС ОБ'ЄКТА І ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ.	15.10.2023	
3	ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	25.10.2023	
4	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДНЯТТЯ ПІДОШВИ	01.11.2023	
5	РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНКЕРУВАННЯ	15.11.2023	
6	ОХОРОНА ПРАЦІ	20.11.2023	
7	ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ І ПІДГОТОВКА ДО ЗАХИСТУ	05.12.2023	

Студент

_____ Васильцова А.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Сахно І.Г.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Васильцова А.О. Вибір способу боротьби з підняттям підосви гірничих виробок і обґрунтування його параметрів в умовах пл. d₄ бл.10 ПРАТ ш/у Покровське» / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 184 «Гірництво». – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Магістерська робота присвячена вирішенню актуального завдання вибору способу боротьби з підняттям підосви гірничих виробок для умов відпрацювання пл. d₄ ПРАТ «Ш/у Покровське».

Явище підняття підосви проявляється ще на етапі проведення штреків. Під дією перерозподіленого напруження навколишня порода підосви виробки зазнає розтріскування, що збільшує пластичну деформацію, поширюючи тріщини всередину масиву. Перспективний напрямок дослідження – визначення шляху навантаження пород підосви при проведенні штреків. А також метод дослідження – метод комп'ютерного моделювання.

Встановлено, що породи підосви завантажуються циклічно при переході з зони підвищених напружень попереду вибою в зону розвантаження за вибоєм. Відомо, що циклічне навантаження порід призводить до суттєвого зниження їх межі міцності.

Запропоновано два методи боротьби з підняттям підосви – розвантажувальні свердловини і анкерування. Проведено моделювання обох методів.

Обрано установку анкерів. Встановлено, що анкери суттєво зменшують розміри області зони руйнування в підосві штрека, позитивно впливають на перерозподіл напружень і деформацій навколо виробки суттєво стабілізуючі їх флуктуацію. Розрахунки показали, що анкерування гарантовано зменшує пучіння на 32%.

Порівняння варіантів вказує, що використання анкерів дешевше ніж підбивка порід, що використовується на шахті на 11,3%.

Ключові слова: шахта, анкер, штрек, напруження, деформації.

ABSTRACT

Vasylytsova A.O. The choice of a method of floor heave control in mining workings and the substantiation of its parameters in the d₄ seam block 10 Pokrovske mine / Graduation qualifying work for obtaining an educational degree «Master» specialty 184 «Mining». - SHEI DonNTU, Lutsk, 2023.

The master's work is devoted to the solution of the urgent task of improving the method of floor heave control in mining workings and the substantiation of its parameters in the d₄ seam block 10 Pokrovske mine

The floor heave phenomenon is revealed even at the stage of workings excavation. Under the action of redistributed stress, the surrounding rock of the workings in floor undergoes cracking, which increases plastic deformation, spreading cracks inside the massif. A promising direction of the research is to determine the load path of the sole rocks during excavation. And also the method of research is the method of computer simulation.

It was established that the rocks of the floor are loaded cyclically when moving from the zone of increased stresses in front of the workings face to the unloading zone behind the face. It is known that cyclic loading of rocks leads to a significant decrease in their strength limit.

Two methods of floor heave control are proposed - unloading wells and rock bolting. Both methods were simulated in ANSYS.

Rock bolting was selected. It was established that the bolts significantly reduce the size of the area of the destruction zone in the floor of working, have a positive effect on the redistribution of stresses and deformations around the working, significantly stabilizing their fluctuation. Calculations showed that rock bolting is guaranteed to reduce heaving by 32%.

A comparison of the options indicates that the use of bolts is 11.3% cheaper than floor rock digging, which is used in the mine.

Key words: mine, rock bolt, mine working, stress, strain.

ЗМІСТ

Вступ	6
1. КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ПРАТ «Ш/У ПОКРОВСЬКЕ»	9
2. ОПИС ОБ'ЄКТА І ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ. АНАЛІЗ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ПРОВЕДЕННЯ І КРІПЛЕННЯ ШТРЕКІВ НА ПРАТ «Ш/У ПОКРОВСЬКЕ»	12
3. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПРОБЛЕМАМ ПІДНЯТТЯ ПІДОШВИ	21
3.1 Короткий огляд гіпотез, що пояснюють причини пучіння	22
3.2 Основні способи запобігання підняттю підосви в гірничих виробках	28
3.3 Аналіз сучасних досліджень механізму підняття підосви. Вибір напрямку і методу дослідження	34
4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДНЯТТЯ ПІДОШВИ	41
4.1 Обґрунтування параметрів моделі. Схема чисельного експерименту	41
4.2. Результати математичного моделювання	50
4.3 Дослідження способу зниження напружень в масиві розвантажувальними свердловинами	61
4.4 Дослідження способу зниження підняття підосви анкерним кріпленням	65
5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНКЕРУВАННЯ	70
5.1 Опис запропонованої системи кріплення штрека блока 10	70
5.2 Прогнозування підняття підосви за весь термін існування виробки за стандартною методикою (до і після анкерування)	72
5.3 Техніко-економічне порівняння варіантів	74
6. ОХОРОНА ПРАЦІ	77
6.1 Основні вимоги Правил безпеки в вугільних і сланцевих шахтах до проведення підземних виробок	77
6.2 Заходи безпеки при бурінні шпурів під анкери	79
6.3 Вимоги до установки ампул	80
6.4 Вимоги до установки анкерів	81
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85

ВСТУП

Російсько-українська війна підвищила важливість питань енергетичної безпеки країн світу. Європейський Союз (ЄС), протягом багатьох років залежав від імпорتنих джерел енергії, і велика частка поставок природного газу в ЄС, як і в Україну, надходила з Росії. Російсько-українська війна, посилила необхідність посилення рівня енергетичної безпеки в Європі. Обсяг торгівлі енергоносіями різко скоротився, а перебої в транспортуванні енергії та обмежені потужності для зберігання в країнах ЄС поставили під високий ризик енергетичну безпеку в країнах, залежних від імпорту енергії. Оскільки останніми роками глобальні товарні ринки зазнали величезних потрясінь, ціни на енергоносії значно зросли, що спричинило значні проблеми для країн і суспільств.

Зобов'язання щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та прискорене поширення відновлюваної енергії створюють додатковий тиск на безпеку енергопостачання через ненадійний характер поточних відновлюваних джерел енергії. Гарантування надійного, адекватного та екологічно чистого енергопостачання є основною метою, яка є серйозною проблемою.

Означена проблема вкрай загострена для України, оскільки окрім загальносвітових проблем додається небезпека обстрілів енергетичної інфраструктури. В таких умовах країна може розраховувати тільки на власні енергоресурси. Не зважаючи на активізацію власного газовидобутку, цим ресурсом на сьогодні неможливо закрити внутрішні потреби. Найбільш перспективним власним енергоресурсом, є кам'яне вугілля.

Кращім підприємством з вуглевидобутку в Україні є ПРАТ ш/у Покровське. Підприємство в складних умовах військового стану підтримує рівень видобутку і вводить нові лави. Інтенсивне відпрацювання запасів разом з тим пов'язано з низкою проблем. Одною з найбільш актуальних є стійкість виробок.

Основна увага магістерської роботи приділена пошуку шляхів боротьби з підняттям підосви гірничих виробок пл. d₄ ПРАТ «Ш/у Покровське». Явище підняття підосви особливо гостро стоїть для штреків, що обслуговують очисні вибої. Хоча ще на етапі проведення штреків цей феномен проявляється, хоч і не так сильно. Хоч на шахті і використовується сучасна і потужна техніка для проведення виробок і сучасні системи кріплення боків і покрівлі, породи підосви залишаються не закріпленими. Додаткові заходи з передбачення і запобігання розвитку підняття підосви також не використовуються. Вже по факту порушення експлуатаційного стану виробок через підняття підосви проводиться підбивка порід механізованим способом машинами ковшового типу.

Враховуючі масштабність цього явища і поточні обсяги проведення виробок (28 км на рік) актуальність теми магістерської роботи не викликає питань.

Об'єкт дослідження – підземні гірничі виробки пл. d₄ ПРАТ «Ш/у Покровське».

Предмет дослідження – явище підняття підосви штреків.

Мета роботи: вибір способу боротьби з підняттям підосви гірничих виробок для умов відпрацювання пл. d₄ ПРАТ «Ш/у Покровське».

Завдання:

1. Короткий аналіз підприємства з видобутку вугілля.
2. Опис об'єкта і предмета дослідження. Аналіз техніки і технології проведення виробок (на прикладі 10 півн. «біс» конвеєрного штреку блока 10).
3. Огляд літературних джерел, присвячених проблемам підняття підосви.
4. Вибір способу боротьби з підняттям підосви і обґрунтування його параметрів.

Методи дослідження.

Використовувались метод аналізу і синтезу при аналізі літературних джерел, метод інженерного аналізу і інженерних розрахунків, метод кінечних елементів – при дослідженнях і обґрунтуванні параметрів способу.

Структура та обсяг роботи.

Робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 29 найменувань; містить 79 сторінок основного тексту, 39 рисунків, 3 таблиці, загальний обсяг роботи складає 87 сторінок.

1. КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ПРАТ «Ш/У ПОКРОВСЬКЕ»

Підприємство з підземного видобутку кам'яного вугілля ПРАТ «ш/у Покровське» найсучасніша шахта в Україні. До того ж це наймолодша шахта побудована в 1990р. Розумний менеджмент і стратегічне планування сприяли безперервній модернізації, що дозволило суттєво перевиконати планований проектний рівень видобутку вугілля. Замість проектного терміну служби, котрий становив 60 років, промислові запаси поля в межах відведених на етапі проектування (101,8 млн тон) були вилучені за 35 р, з перевищенням річного видобутку в окремі роки більше ніж в 3 рази. Ще на стадії допрацювання виділених запасів ПРАТ «ш/у Покровське» отримало дозвіл на «дорізку» резервної ділянки по падінню пласта, фактично отримавши поле для нової шахти з трьох блоків №10, №11, №12. Гіпсоплани шахти при введенні в експлуатацію і після дорізки запасів кам'яного вугілля з трьох блоків наведені на рис. 1.1.

Промислова вугленосність на полі шахти пов'язана з відкладеннями свит C_1^4 та C_1^5 нижнього карбону. З 27 вугільних пропластків, локалізованих в межах шахтного відведення, лише пласт d_4 має витриману робочу потужність у встановлених межах. На незначних ділянках також робочу потужність має пласт d_6^1 . Потужність інших прошарків не перевищує 0,40 м [1].

Пласт d_4 переважно складної будови з геологічною потужністю 0,75-1,90 м. Проста будова пласта спостерігається лише в північно-східній частині поля. Потужність пласта в цій частині 0,75-1,60 м [1]. Вугілля коксівне, марки ГЖ і частково ОС. На всій площі вугілля містить мало сірки, в середньому 0,8 %. Зольність пласту не постійна і поступово збільшується від центру до периферії поля [1].

Бічними породами є пісковики, алевроліти й аргіліти. Ступінь стійкості пісковиків змінюється від стійких до малостійких, алевролітів-від мало стійких до не стійких, аргіліти-як правило не стійкі. При потужності до 0,5 м алевроліти й аргіліти характеризуються як не стійкі, схильні до утворення

«помилкової» покрівлі. У зонах тектонічних порушень і підвищеної тріщинуватості можливі вивали порід покрівлі висотою до 4-6 метри [1].

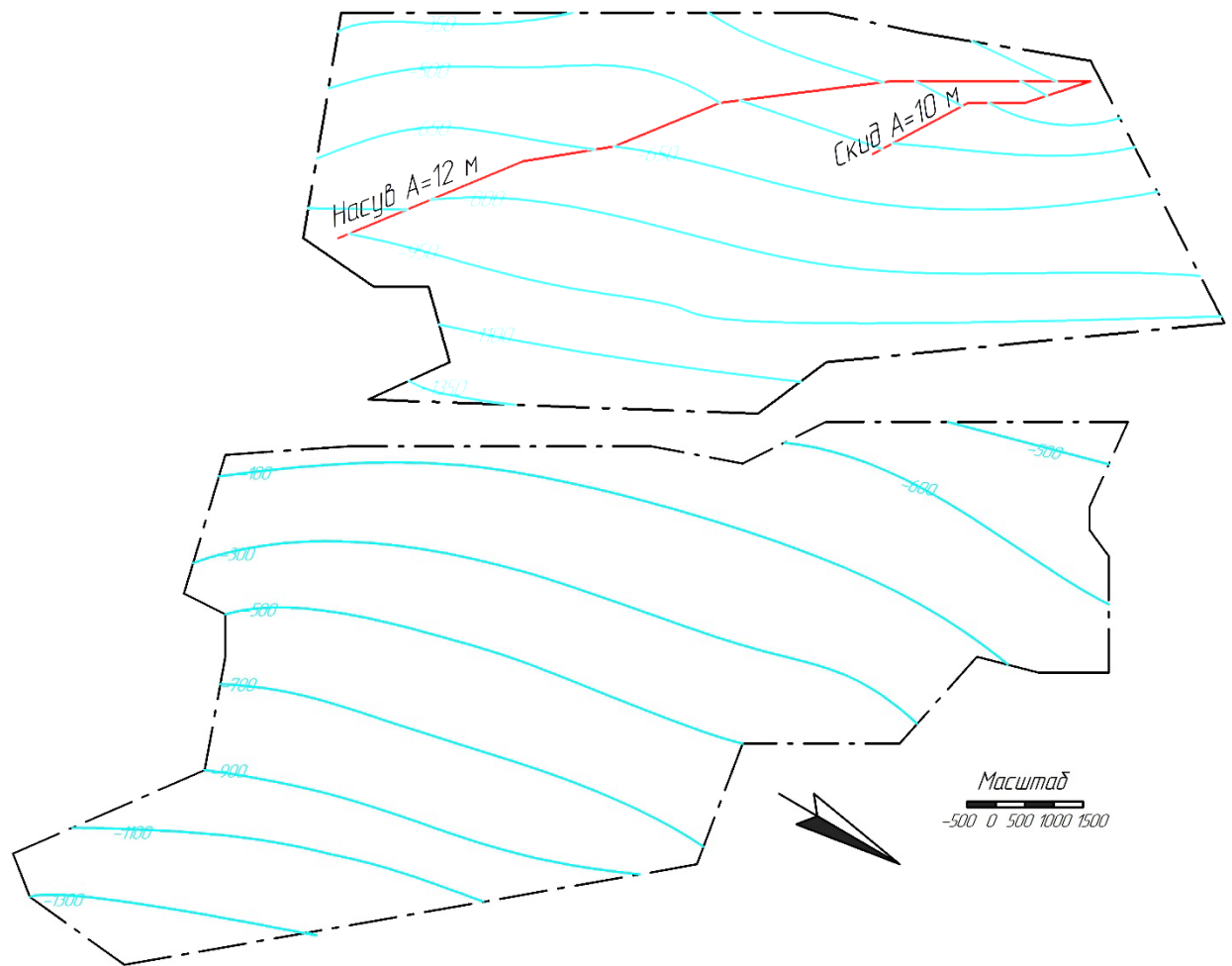


Рисунок 1.1 – Гіпсоплани ПРАТ «ш/у Покровське» при запуску шахти (а) і дорізаної частини запасів вугілля (б)

Пласт d_1^6 розташований на 220-230 м вище за d_4 . Робочої потужності пласт досягає на невеликих відокремлених площах і промислового значення не має [1].

Шахта видобуває вугілля механізованими лавами з проєктним річним навантаженням біля 1,000 млн тон. Роботи з видобутку ведуться лише на пл. d_4 . Одночасно в роботі близько 6-8 лав. Категорія шахти–надкатегорійна по газу метану, небезпечна за раптовими викидами. Нижче глибини 600м, пісковики небезпечні по ГДЯ. Поле складено породами світ C_1^4 і C_2^0 ,

покритими утвореннями третинного (неогенного) і четвертинного віків. Четвертинні відкладення поширені суцільним покривом і представлені суглинками і глинами з вапняними стягненнями і сланцями залізнення [1].

2. ОПИС ОБ'ЄКТА І ПРЕДМЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ. АНАЛІЗ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ПРОВЕДЕННЯ І КРІПЛЕННЯ ШТРЕКІВ НА ПРАТ «Ш/У ПОКРОВСЬКЕ»

В якості об'єкта дослідження в магістерській роботі прийнято конвеєрні штреки блока 10. Предметом дослідження є процес підняття підпошки (пучення) в конвеєрних штреках.

Для розкриття технологічних обставин, що формують проблематику дослідження розглянемо геологічну і технологічну інформацію, що може вважатися вихідною інформацією.

Для написання розділу використано паспорт проведення і кріплення 10 півн. «біс» конвеєрного штрека бл. 10, що уособлює собою типові геологічні і технічні умови блока 10.

Вугільний пласт має переважно просту будову, локально зустрічаються розщеплення пласта на невеликій площі на дві окремі пачки розділені породним прошарком, як правило представленим сірим алевролітом. Структурна будова пласта зображена на рис. 2.1. Пояснення літології розкриті в таблиці 2.1.

Породи основної покрівлі мають переважно категорію А2 по класифікації ДонВУГІ і представляють собою достатньо міцні породи пісковика мілкозернистого. Ці породи позначені на структурній колонці цифрою 7.

Безпосередня покрівля представлена алевролітом темно сірим, який за своїми характеристиками відповідає класу Б4 в класифікації ДонВУГІ. Місцями стійкість порід зменшується і зустрічаються по трасі штрека локальні зони з виходом порід, що відповідають класу Б3. Локалізація таких зон показана на рис. 2.2. Ці породи позначені на структурній колонці цифрою 8.

Найбільшу занепокоєність щодо стійкості викликають породи безпосередньої підпошки - алевроліт слюдистий, горизонтальношаруватий, котрий позначений на структурній колонці цифрою 10.

Таблиця 2.1 – Характеристика порід пласта d₄ по трасі 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

№ на колонці	Нормальна потужність	Опис порід	Межа міцності в сухому стані, МПа	Межа міцності в водонасиченому стані, МПа
6	1,0-3,5	Алевроліт темно сірий, нешаруватий, з невеликим вмістом слюди, з одиничними відбитками флори поганої збереженості, з одиничними тріщинами відкритого типу під кутом 60-70 градусів	35,2	20,0
7	7,75-8,40	Пісковик сірий, мілкозернистий, полевошпатово-кварцевий на глинистому цемент, нешаруватий, місцями тонкохвилястий за рахунок наливів, з одиничними тріщинами відкритого типу під кутом 70-80 градусів	62,5-94,3	55,0-73,5
8	0,0-1,2	Алевроліт темно сірий, з малим вмістом слюди, з одиничними відбитками флори поганої збереженості, на початку шару «кучерявчик» нешаруватий, місцями комкуватий з відбитками стігмарій	38,4-52,5	32,0-42,8

Продовження табл. 2.1

9	0,72-1,0	Вугілля просте, локально складної будови, напівблискуче, шарувате, напівматове, по нашаруванню раковисте, місцями з лінзами піриту	10,0-15,0	-
10	3,45-7,10	Алевроліт темно-сірий, з слюдой, горизонтальношаруватий, з відбитками флори середньої збереженості, з одиничними тріщинами відкритого типу під кутом 80-90 градусів	33,0-54,4	28,0-45,0
11	0-0,90	Вугілля (некондиційна потужність) чорне напівблискуче, полосчате, по нашаруванню раковисте, місцями з лінзами піриту	10-15,0	-

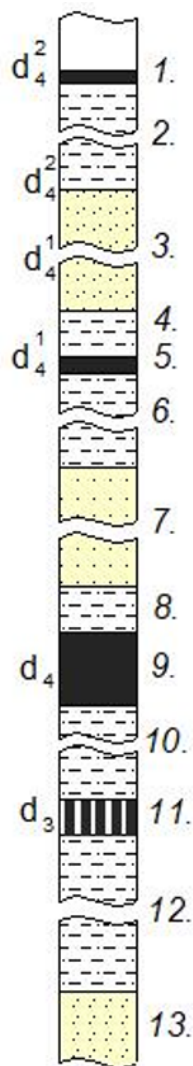


Рисунок 2.1 – Зведена стратиграфічна колонка пласта

Безпосередня підосва, згідно з касифікацією порід нижнього шара підосви вугільних пластів, відповідає категорії ПЗ (стійка), хоча в характерних зонах вони відповідають категорії П2 (малостійка). Положення цих зон по трасі виробки позначено на рис. 2.2. Ці зони відповідають ділянці штрека між пікетами ПК19-21, ПК138-154 і ПК156-160. В зазначених ділянках доречно очікувати підняття підосви більші, ніж в середньому по трасі виробки, що вимагає завчасного проєктування відповідних заходів, спрямованих на стримування розвитку цього процесу.

Окрім цього загальне погіршення гірничо-геологічних умов спостерігається в зонах геологічних порушень, які пересікають трасу виробки. В першу чергу, це підвищена тріщинуватість, водоприпливи, гадовиділення. Такі порушення зустрінуті між пікетами: ПК184+9-185+3, 114+4-115, 10+8-107, 165. Деталізаційні розрізи по зазначеним геологічним порушенням, як плікативним, так і диз'юнктивним, наведені на рис. 2.3.

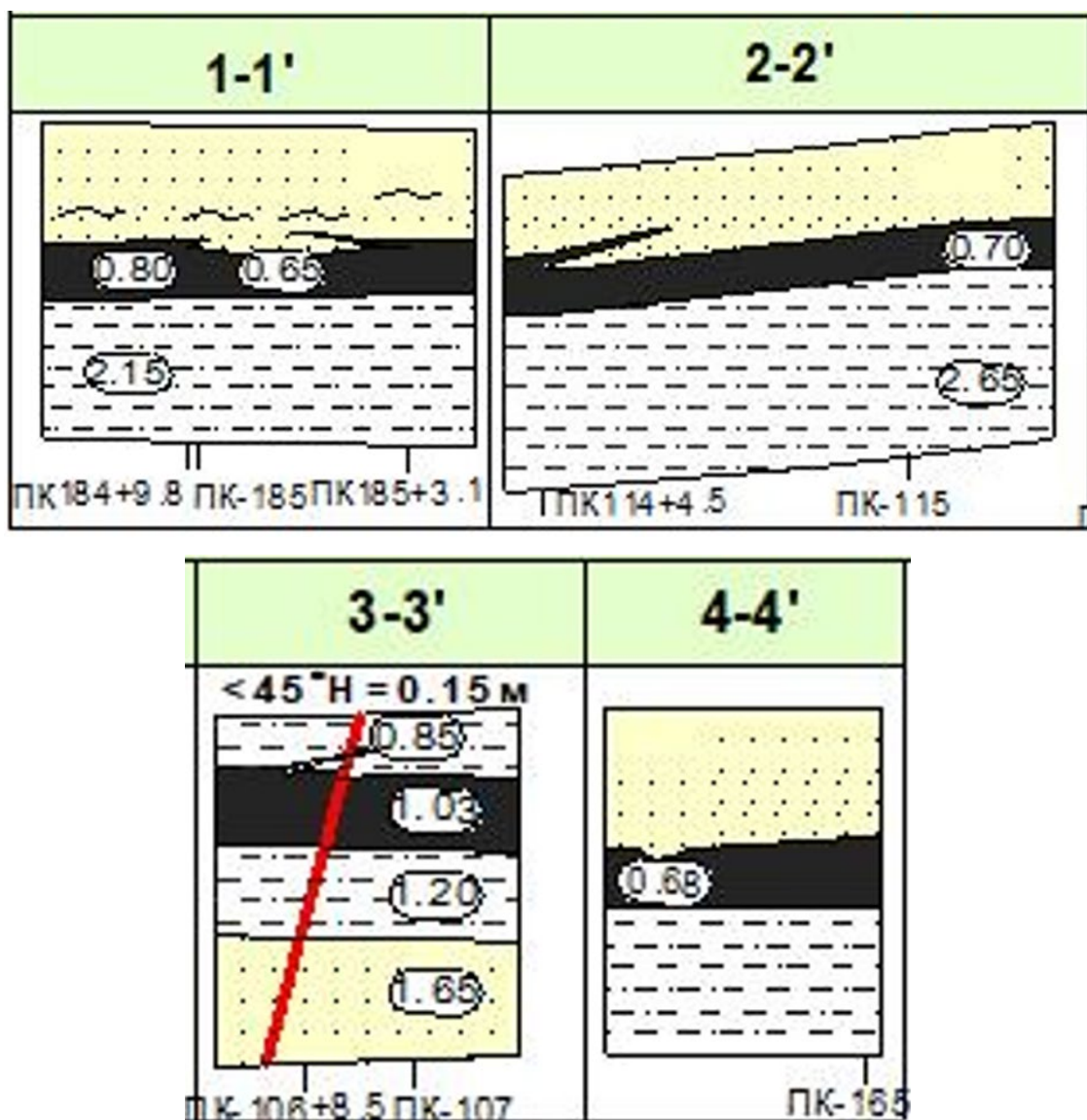


Рисунок 2.3 – Деталізаційні розрізи по геологічним порушенням, що пересікають трасу 10 півн. «біс» конвеєрного штрака

Проведення 10 півн. «біс» конвеєрного штрака ведеться механічним/комбайновим способом (КСП-42/або КСП-43). На рис. 2.4

наведено вертикальний розріз виробки. Породна маса перевантажується на стрічку конвеєра 1ЛТП-1000 перевантажувачем стрічковим ППЛ. Порода додатково підкидається лопатами в ручну до конвеєра.

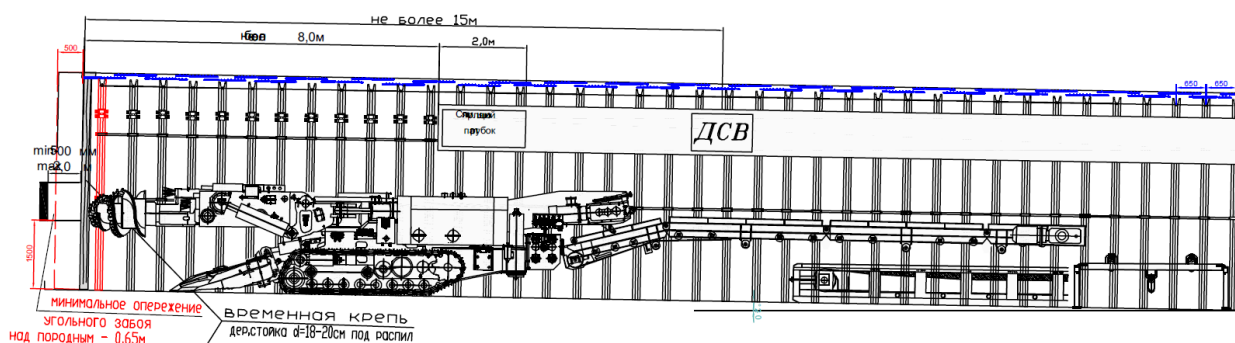


Рисунок 2.4 – Вертикальний розріз вибою 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

Переріз при проведенні, згідно паспорту, становить $23,7\text{ м}^2$, в світлі – $20,7\text{ м}^2$. Схема штрека при проведенні наведена на рис. 2.5.

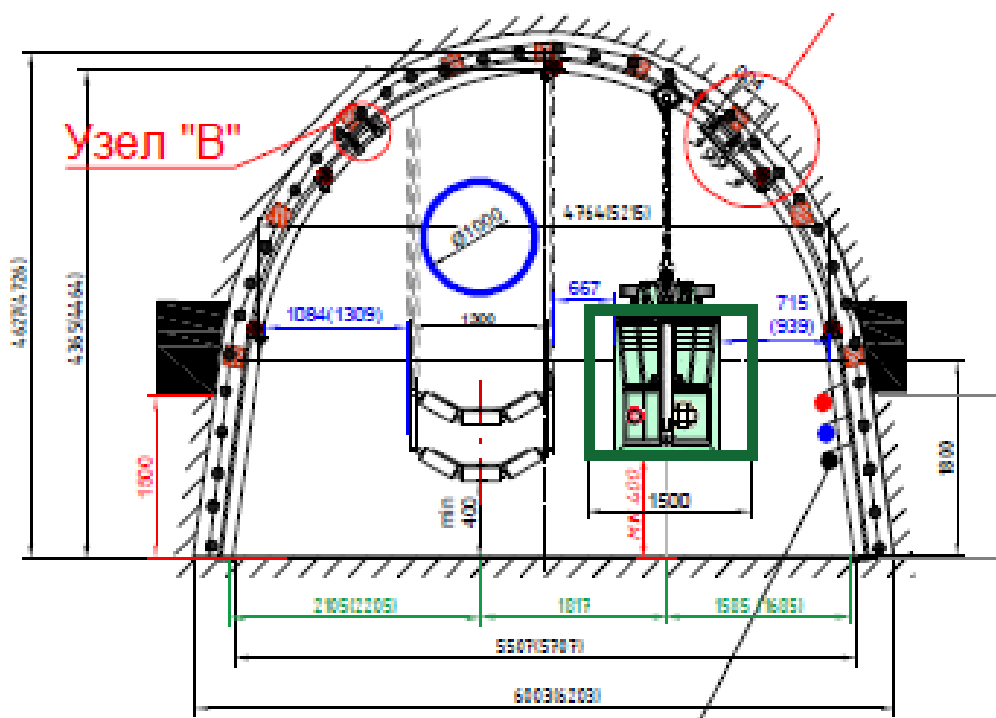


Рисунок 2.5 – Переріз 10 півн. «біс» конвеєрного штрека при проведенні виробки

Використовується як основне кріплення трьохланкове шатрове КШПУ-20,3. Крок встановлення 1,5 рам/м. Затяжка боків і покрівлі штрека – сітчаста металева. Паспорт передбачає використання тільки рамного кріплення при проходці, і анкерно-рамного при експлуатації штрека. Ні під час проходки. Ні під час експлуатації виробки при роботі лави жодних заходів з кріплення підосви штреку не передбачається. Така практика характерна для ПРАТ ш/у Покровське і взагалі українських вугільних шахт. Тобто підосва штрека залишається незакріпленою весь життєвий час виробки.

Як вже зазначалось відсутність заходів з кріплення підосви, або будь-якої протидії підняттю підосви (пученню) призводить до примусової підривки підосви. Такі роботи ведуться машиною підривною ковшового типу EL160. Розміщення машини в виробці при її роботі наведено на рис. 2.6.

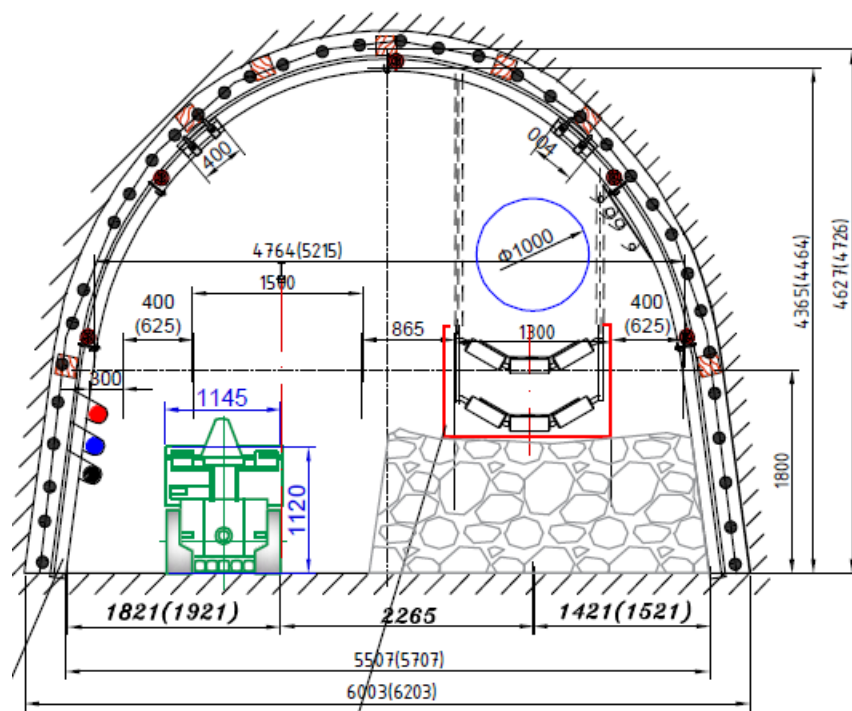


Рисунок 2.6 – Підривка порід машиною EL160

Наведений паспорт є типовим для ПРАТ ш/у Покровське в блоці 10 і характеризує рівень прийняття рішень технологічного напрямку в проходці виробок. Згідно з рисунком 2.5 в штреці використовується підвісний

стрічковий конвеєр 1ЛТП-1000 і моно рейкова дорого. Тобто норми Правил Безпеки до допустимих величин підняття підошви (пучення) не такі жорсткі як при рейковому транспорті. Допускається підняття до 400 мм. Проте досвід проведення і експлуатації штреків в блоці 10, свідчить, що фактичні підняття можуть перевищувати регламентовану Правилами безпеки величину. Особливо небезпечними є зони нестіких порід, зони високої тріщинуватості, геологічних порушень і таке інше. Стосовно 10 півн. «біс» конвеєрного штрека такі зони наведені на рисунках 2.2-2.4.

3. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПРОБЛЕМАМ ПІДНЯТТЯ ПІДОШВИ

3.1 Короткий огляд гіпотез, що пояснюють причини пучіння

У численних глибоких інженерних проектах зі слабкими породами часто траплялися руйнування підосви після проведення виробок: деформація, пов'язана з цим, зазвичай безперервна, що призводить до сильного видавлювання та розтріскування підосви виробок, що впливає на реалізацію проекту та безпеку робіт. Проблема підняття підосви характерна не тільки для шахт. Таке явище спостерігається при проведенні тунелів цивільного будівництва в гористій місцевості, будівництві підземних геооб'єктів метро і ін. Але найбільш гостро підняття підосви стоїть для глибоких підземних виробок вугільних шахт. Саме тому найбільший досвід боротьби з підняттям підосви накопичено у вугільних шахтах. Слід однак зазначити, що механізми розвитку підняття підосви типізовані в цілому, і в більшості випадків є однаковими на різних об'єктах підземного і поверхневого будівництва. Через це доцільно аналізувати дослідження вчених, проведені в різних умовах.

В даний час багато вчених провели обширні дослідження механізму підняття підосви за допомогою моніторингу в реальних шахтних умовах, механічних випробувань, чисельного моделювання та інших методів. Результати показали, що пучення підлоги тісно пов'язане з такими факторами, як горизонтальне напруження порід, структура гірського масиву, ґрунтові води, метод проведення виробки і спосіб її підтримання. Ці дослідження проводяться достатньо активно і в останні роки [2, 3, 4].

Підняття підосви можна класифікувати на кілька типів, включаючи:

- прогин,
- здуття,
- пластичну течію,
- руйнування несучої здатності.

В кожному випадку запропоновані відповідні заходами контролю [5].

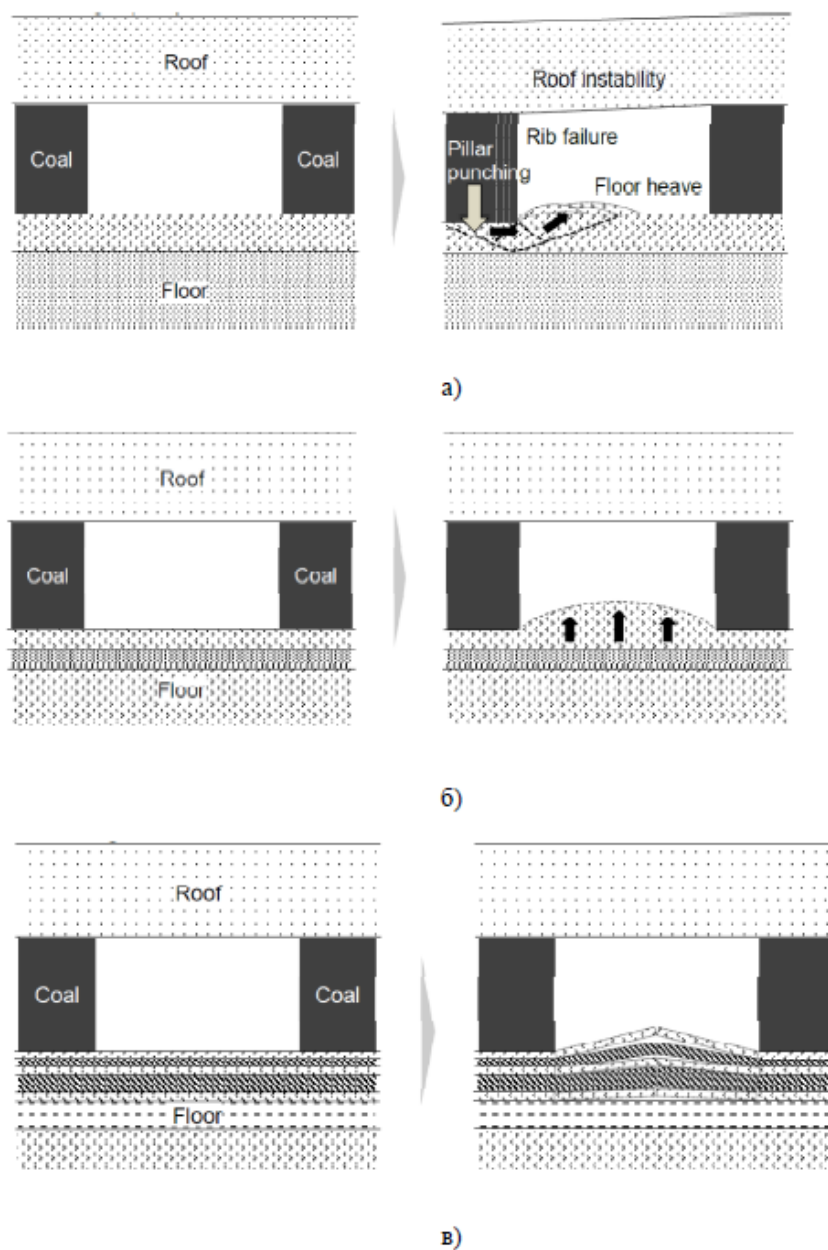


Рисунок 3.1 – Механізми розвитку підняття підосви [5]: а) втрата несучої здатності, б) здуття, в) прогин

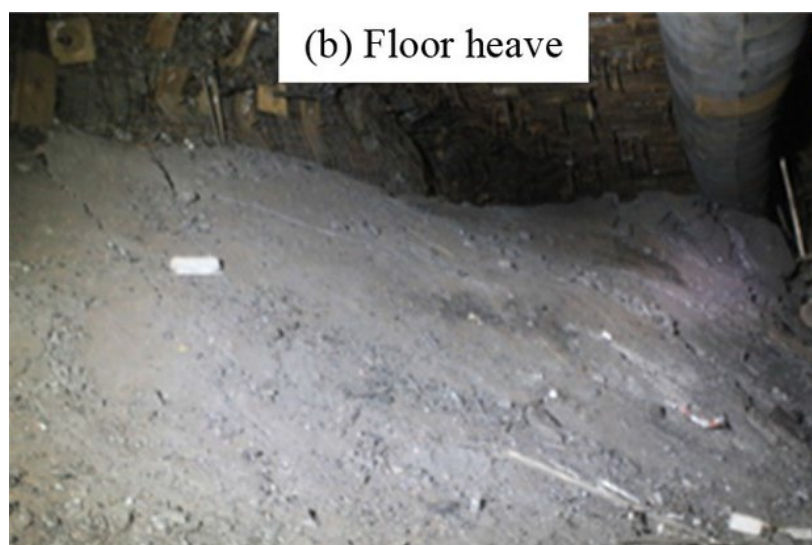
Приклади критичного некерованого підняття підосви в шахтах Австралії і Китаю, які викликані прогином порід в напрямку підосви виробки наведені на рис. 3.2 а, б. Приклади підняття підосви через набухання наведено на рис. 3.2 в.



a)



б)



B)



г)

Рисунок 3.2 – Фото підняття підосви в шахтах Австралії (а, г) і Китаю (б, в) при розвитку механізму прогину (а, б), набухання (в), втрати несучої здатності (г)

Розвиток підняття підосви за схемою набухання пов'язаний передусім з насиченням порід водою і незворотніх фізикохімічних перетвореннях внаслідок цього. Тобто такий механізм виключно визначається параметрами вологоємності, пористістю, вмістом глинистих часток, що обумовлюють схильність до набухання при зволоженні. Методи боротьби з підняттям підосви в цьому випадку ґрунтуються на запобіганні намокання порід, стримувані водопритоків, обладнанні водозавіс і т.ін.

Розвиток підняття підосви за схемою прогину в бік виробки в першу чергу характерний для шаруватих порід з низьким коефіцієнтом зчеплення між шарами. Слабкі міжшарові зв'язки сприяють почерговому розшаруванню і коробленню порід в напрямку підосви штреку. Такий механізм розвивається при проведенні виробок і підтриманні їх в умовах масиву порід. Методи боротьби з цим явищем ґрунтуються в першу чергу на зв'язуванні між собою

шарів підосви в один більш потужний шар. Таким чином збільшується момент інерції і несуча здатність суттєво зростає. Ця концепція реалізується за рахунок анкерного кріплення і нагнітання хімічних сумішей для зв'язування порід в монолітний блок.

Втрата несучої здатності відбувається через підвищення вертикальних тисків, руйнування порід в боках виробки і виникнення додаткових горизонтальних напружень, що підсилюють видавлювання порід. Такий механізм у вітчизняній практиці прийнято називати «видавлюванням з-під штампа». Принципова схема наведена на рис. 3.3а. Вона схожа на теорії розвитку зсувів під опорами/штампами розвинуті в механіці ґрунтів, зокрема роботах Цимбаревича, Гурдуса, Соколовського (рис. 3.3б).

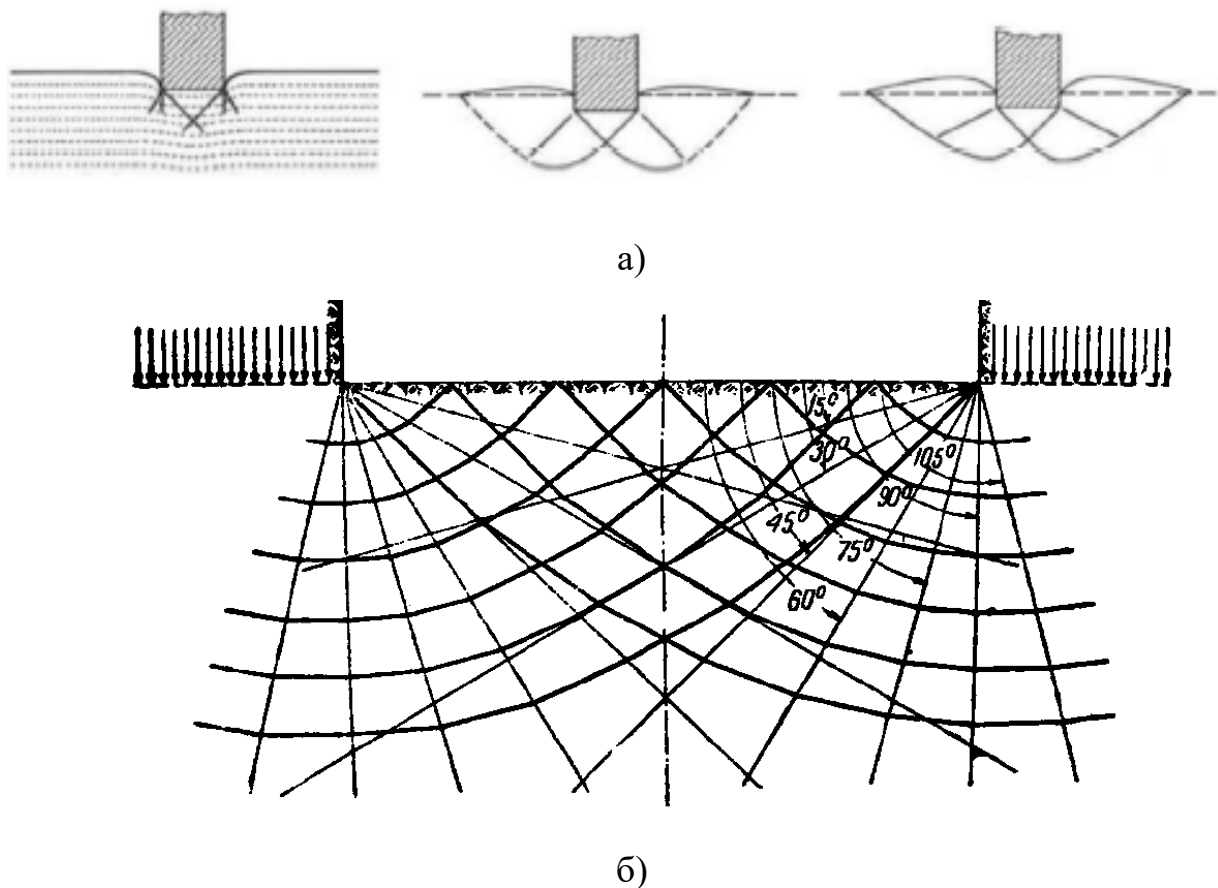


Рисунок 3.3 – Схема втрати стійкості підосви в боку виробки за механізмом втрати несучої здатності (а), видавлювання порід з-під штампа в механіці ґрунтів Цимбаревича (б)

Методи боротьби з цим явищем основані переважно на розвантаженні порід від високих напружень.

Разом з тим ідеальних схем розвитку підняття підосви не буває. В реальних умовах завжди механізми підняття мають комбінований характер з превалюючим впливом того чи іншого фактору. Але для вірного вибору способу боротьби з підняттям підосви треба спочатку виявити за якою схемою розвивається механізм підняття підосви.

Українські вчені приділили вивченню питання підняття підосви також дуже багато уваги. Зокрема останніми роками в ДонНТУ цим питанням займалися Негрій С.Г., Ісаєнков О.О. Схема, що пояснює механізм підняття підосви за механізмом втрати несучої здатності (запропоновано С.Г. Негрієм) наведена на рис. 3.4.

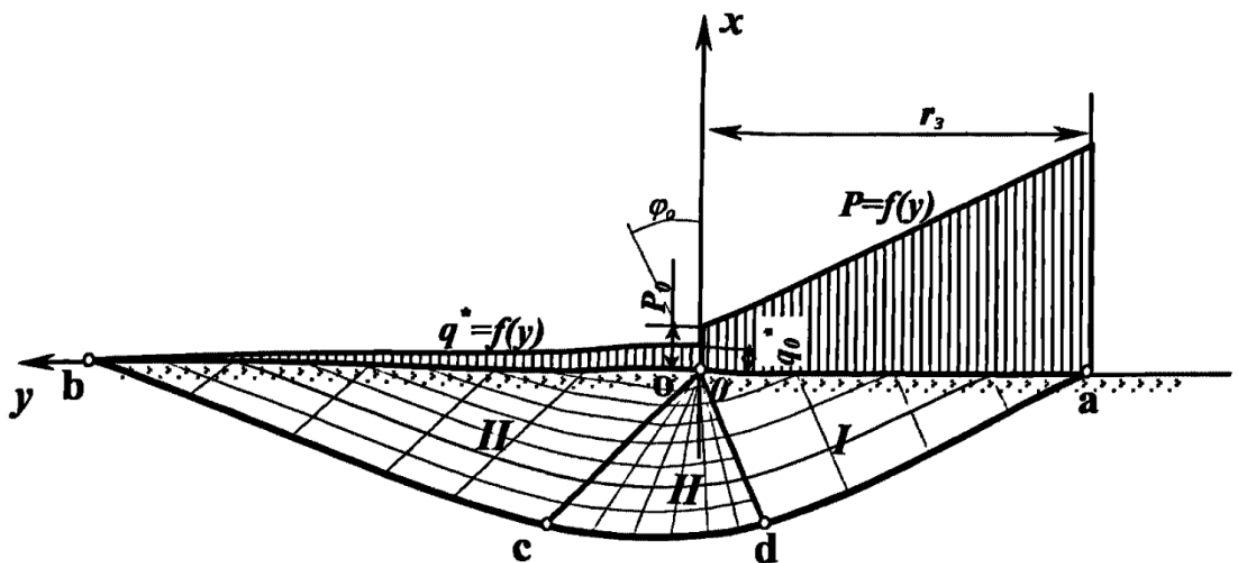


Рисунок 3.3 – Схема визначення стискаючих напруг від пригрузок в боках виробки уздовж позитивної напівосі y (С.Г. Негрій [6])

Слід відмітити роботи проф. Литвинського в цьому напрямку. Зокрема Г.Г. Литвинський запропонував класифікацію механізмів підняття підосви, що характерні для шахт Донбасу (рис. 3.5).

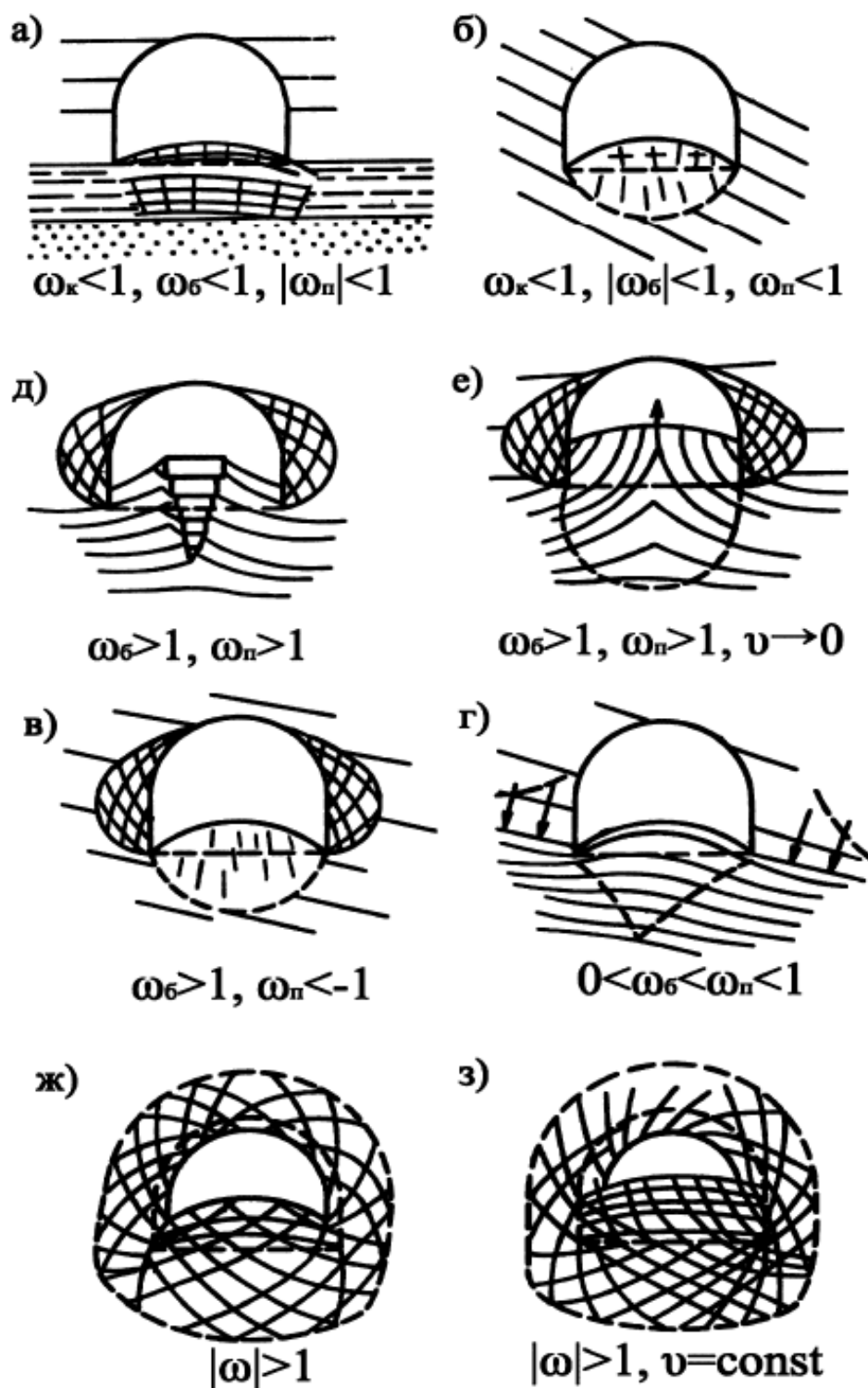


Рисунок 3.5 – Механізми підняття підошви по Г.Г. Литвинському

а) набухання; б) набухання, розмокання; в) розмокання з подальшим набуханням; г) видавлювання з-під штампа; д) поздовжньо-поперечний вигин шарів з утворення зони непружних деформацій; е) вязкопластичне деформування при зволоженні; ж) утворення зони не пружних деформацій; з) в'язка течія в зоні не пружної деформації і при зволоженні [7].

В цілому складові механізми підняття підосви у вітчизняній класифікації проф. Литвинського [7] і популярній в світовому гірництві класифікації Faria Santos і Bieniawski [5] не відрізняються. Це перелічені три механізми підняття (набухання, прогин, втрата несучої здатності). Різницею є варіанти ускладнення, викликані додаванням води.

Аналіз досліджень різних авторів вказує, що по суті, важливою причиною здимання підосви виробки є те, що проведення виробок на великих глибинах суттєво змінює початковий стан рівноваги в навколишній породі та призводять до різного ступеня перерозподілу напруги [8, 9]. Під дією перерозподіленого напруження навколишня порода підосви виробки зазнає розтріскування, що збільшує пластичну деформацію, поширюючи тріщини всередину масиву [10].

3.2 Основні способи запобігання підняттю підосви в гірничих виробках

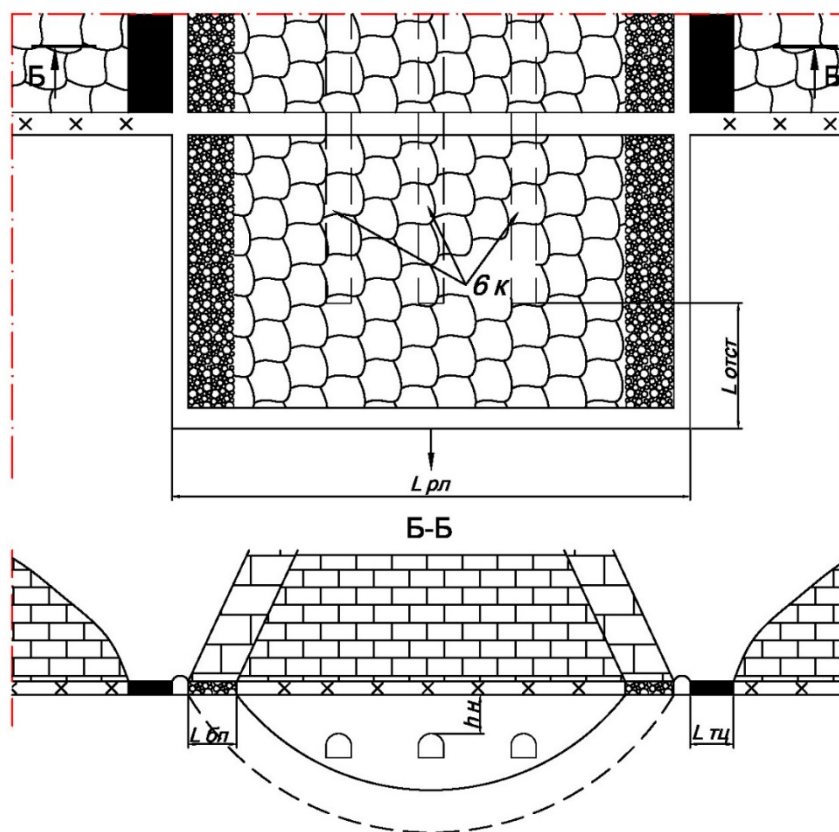
Кожен механізм має свої методи профілактики підняття підосви, ми будемо використовувати найдетальнішу класифікацію методів боротьби з видавлюванням з порід підосви гірничих виробок.

Зниження інтенсивності підняття підосви може проводитися шляхом зниження напруг в породному масиві порід або зміцнення порід чи збереження їх міцності. Основні відповідні способи наведені в таблиці 3.1.

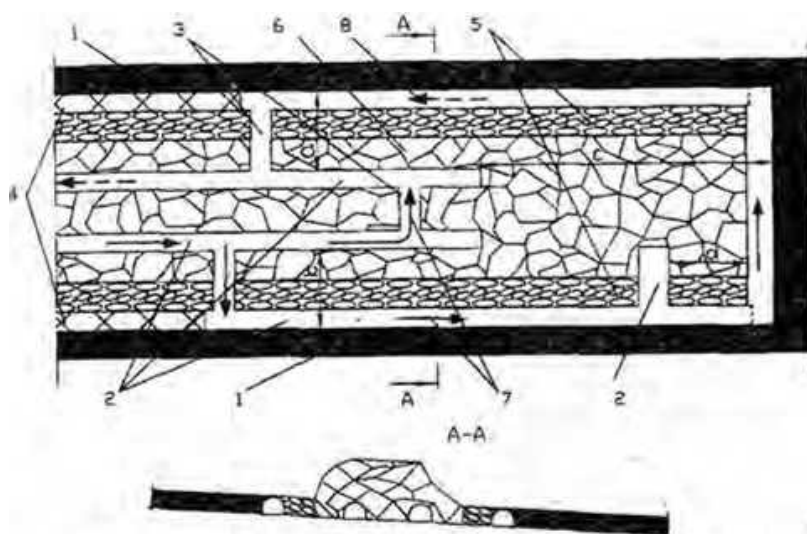
Таблиця 3.1 – Класифікація способів протидії підняттю підосви

№	Способи засновані на:	
	зниженні напруг	зміцненні порід
1	розташування виробок в локальних і регіональних зонах розвантаження (рис. 3.6а);	-зведення різних конструкцій підсилюючого кріплення з метою запобігання розшаруванню і

		руйнуванню порід підосви і їх видавлювання (рис. 3.7а);
2	-залишення ціликів великих розмірів;	-зміцнення масивів порід штучними способами, наприклад, за рахунок нагнітання скріплюючих складів в підосву пласта (рис. 3.7б);
3	-проведення виробок позаду очисного забою у виробленому просторі або в присечку (рис. 3.6 б);	-застосування різних систем полімерних і сталеполімерних анкерів (рис. 3.7в);
4	-штучне зниження напруг у масивах порід, що оточують виробку за рахунок застосування розбурювання крайових частин вугільного масиву (рис. 3.6 в);	застосування активного розвантаження підосви вибуховим способом з подальшим нагнітанням розчинів.
5	-застосування відсічного торпедування зависаючих уздовж виробки консолей міцних порід основної покрівлі, нагнітання води в приконтурної частина вугільного масиву для зниження залишкового опорного тиску на виробки, застосування щілинних і вибухо щілинних способів створення компенсаційних щілин в підосві пласта	

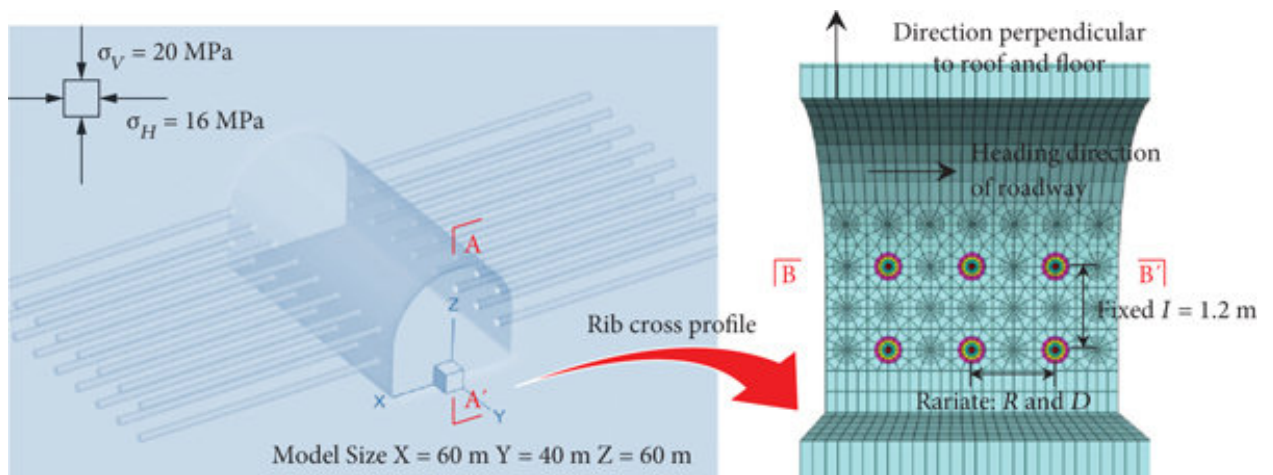


а

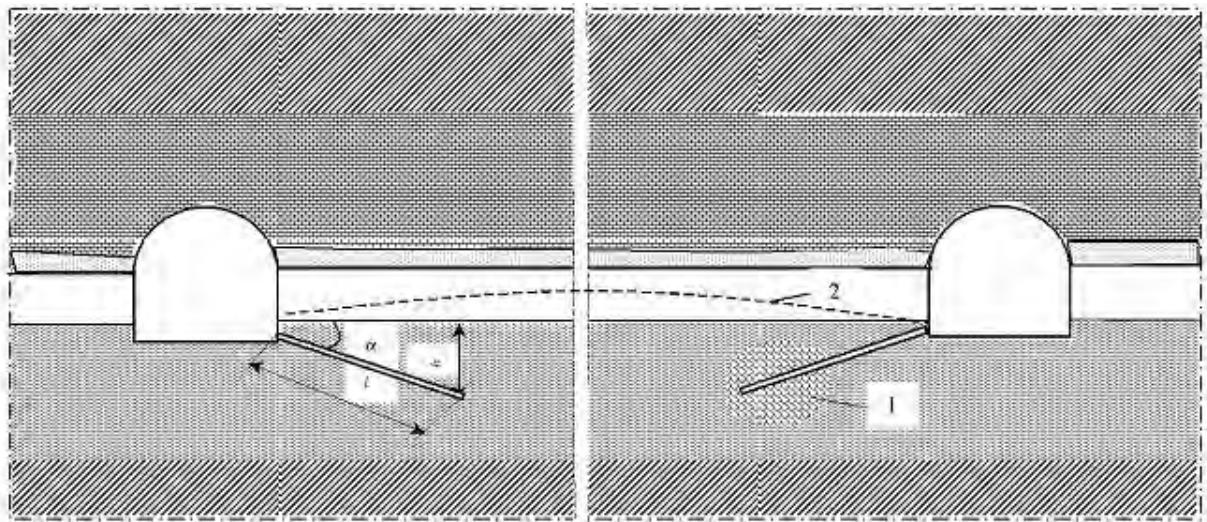


б

Рисунок 3.6 Способи боротьби з підняттям підшви засновані на зниженні напруг: а) розташування виробок в зонах розвантаження, б) проведення виробок позаду очисного забою у виробленому просторі



В



Г

Рисунок 3.6 (продовження) Способи боротьби з підняттям підосви засновані на зниженні напруг: в) свердловинне розвантаження, г) відсічне торпедування.

Регіональні способи обмежені в використанні, тому, що для їх реалізації є необхідність прийняття стратегічних рішень по підготовці шахтних полів, що для умов ПРАТ ш/у Покровське є неприйнятне, оскільки основні рішення з підготовки і систем розробки на шахті прийняті і узгодженні і їх зміна маловірогідна. Методи локального розвантаження і відсічного торпедування передбачають використання вибухових робіт великих масштабів, що в умовах шахти небезпечної по раптовим викидам не прийнятно по ПБ.

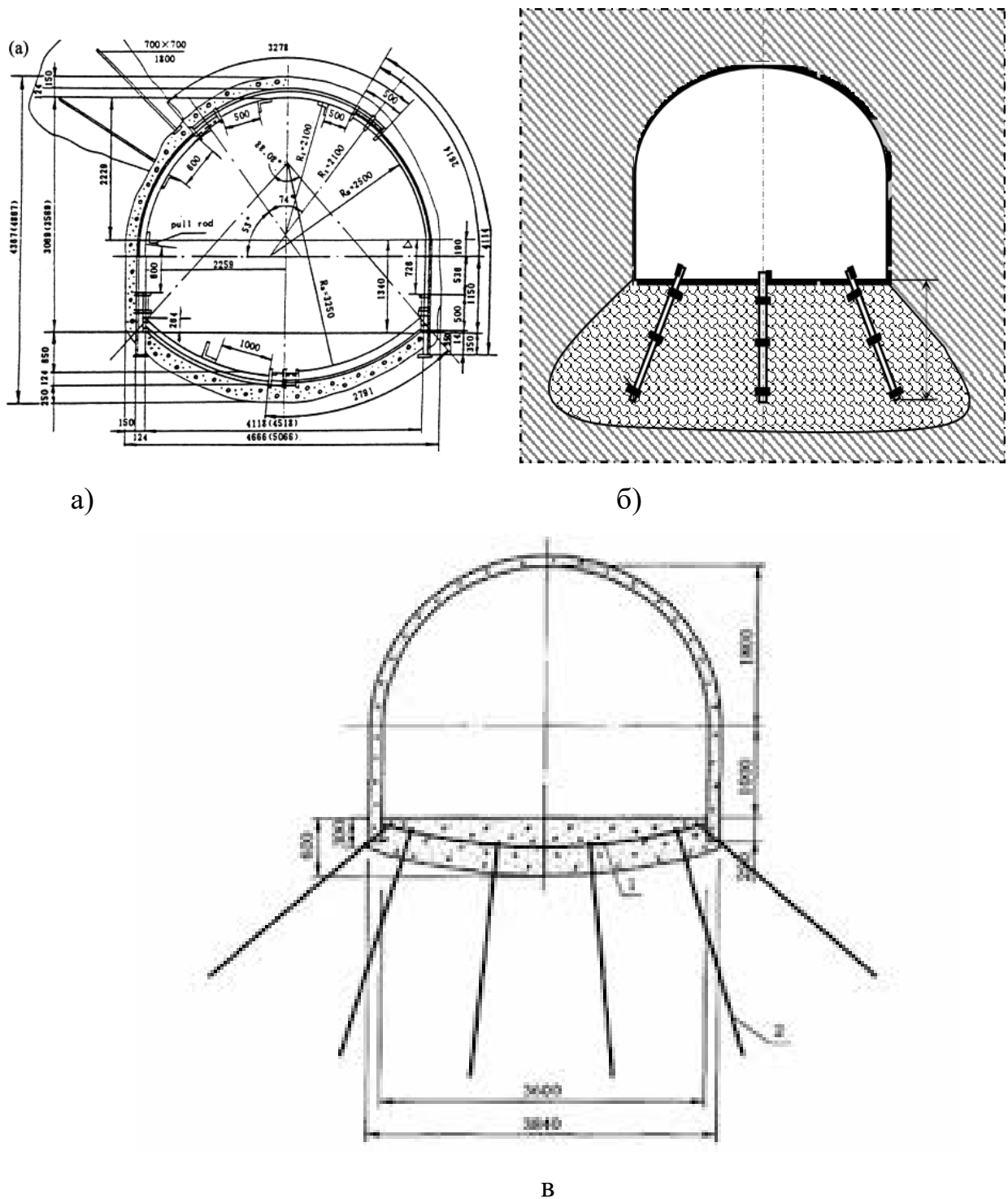


Рисунок 3.7 Способи боротьби з підняттям підшви засновані на зміцненні порід: а) замкнені конструкції кріплення; б) зміцнення підшви нагнітанням; в) сталеполімерні анкери.

Таким чином основна перспектива запобігання підняттю підшви для умов блока 10 – це використання методів зміцнення порід. Що стосується замкнутих систем кріплення, то такі рішення є цілком прийнятними для

виробок, що знаходяться поза зоною впливу очисних робіт. Досвід використання такої практики на шахті є. Так в 2022 році на підприємстві через значні деформації контура виробки було прийнято рішення про перекріплення капітальної виробки, закріпленої КШПУ-М 20,3 з зведення кріплення МКЗО.

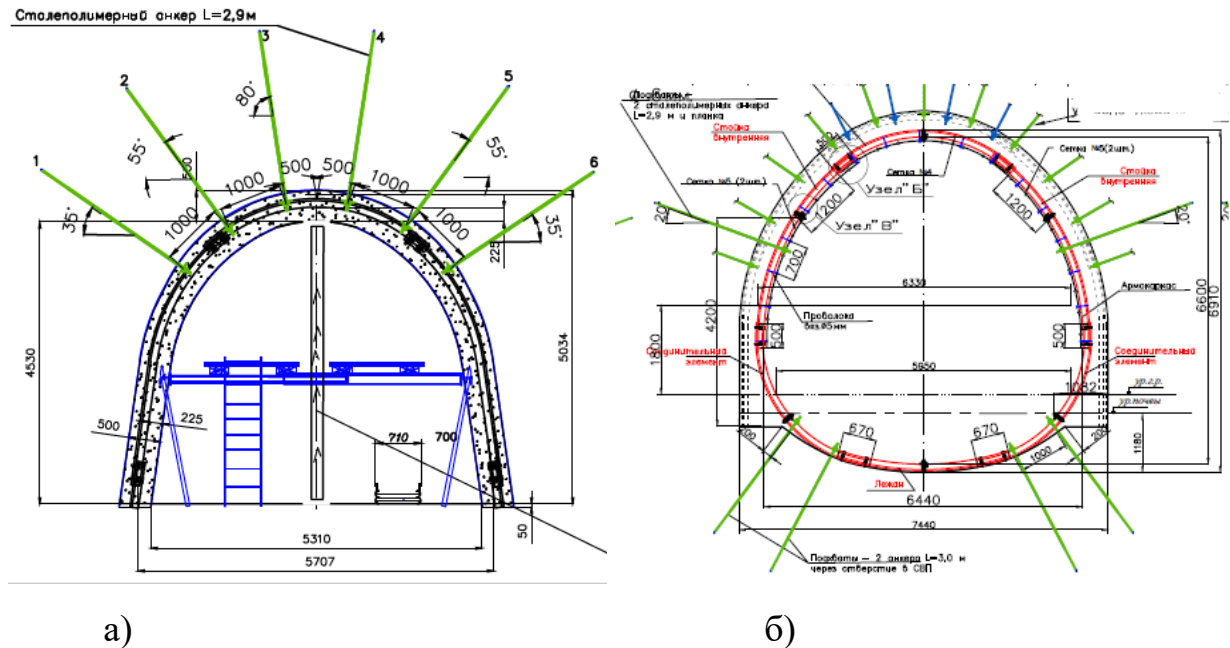


Рисунок 3.8 – Використання замкнених систем кріплення після перекріплення капітальних виробок ПРАТ ш/у Покровське а) Вид виробки з КШПУ 20,3 під час початку перекріплення б) вид виробки після зведення кріплення МКЗО

Окрім використання замкнутого кріплення (рис. 3.8б) в підлошву були встановлені анкери. Досвід показує, що в умовах підвищеного опорного тиску деформації контура виробки занадто великі і стримати їх зазначеним кріпленням неможливо. Тому для дільничних штреків блока 10 використання замнутих систем є неприйнятним не тільки через великі витрати, але й через складність підтримання експлуатаційного стану підлошви виробки.

Таким чином методом виключення приходимо до висновку, що дві технології, що можуть бути використані з можливих варіантів є зміцнення порід скріплюючими сумішами і анкерування підосви.

Для вибору доцільного варіанту слід провести дослідження перспектив кожного з цих способів для умов штреків блока 10.

3.3 Аналіз сучасних досліджень механізму підняття підосви. Вибір напрямку і методу дослідження.

Аналіз традиційних підходів до визначення причин підняття підосви і розробки способів боротьби з цим явищем, вказує, що у дослідженнях, проведених до 2010 року не враховувалися характеристики деформації та руйнування гірської породи під впливом перерозподілу напруги при проходці. Крім того, не враховувалися характеристики цементації порід, низької цілісності та високої неоднорідності [11, 12]. Дослідження механізму здимання підлоги в таких породах були обмеженими.

Шахтні спостереження та лабораторні випробування породи показали, що на її механічні властивості та режими руйнування суттєво впливають не лише властиві характеристики цементації, але й стани напруги та шляхи напруги [13, 14]. Таким чином, необхідно враховувати вплив перерозподілу напруги, спричинений проведенням виробки, на механізм підйому та стійкість виробки, проведеної на великій глибині.

Щоб виявити еволюцію механічних властивостей і процесу руйнування гірської породи під типовими шляхами напруги при виїмці, Wang та ін. було проведено відповідне дослідження за допомогою тривісного випробувального пристрою. Зазвичай зразок піддавався тривісному навантаженню з різними мінімальними та проміжними основними напруженнями для досягнення постпікового стану для моделювання можливого напруженого стану під час виїмки, головним чином зосереджуючись на механічній поведінці, режимі руйнування та крихко-пластичних характеристиках тощо [15, 16]. Однак

проведення виробок призводять до значного регулювання напруги, що є складним процесом навантаження та розвантаження напруги, і його механізм важко пояснити з точки зору одного навантаження.

Деякі дослідники проводили випробування траєкторії навантаження та розвантаження, щоб виявити механізм руйнування виїмки та механічну реакцію розвантаження в різних місцях навколишньої породи [17, 18, 19]. Типові шляхи напруги включають максимальне головне навантаження (σ_1), збереження σ_1 –розвантаження σ_3 , навантаження σ_1 –розвантаження σ_3 та розвантаження σ_1 –розвантаження σ_3 .

Слід зазначити, що вони приділяють більше уваги механічній реакції та характеристикам руйнування породи в стані після піку, щоб імітувати реакцію гірської маси в реальних умовах на проведення виробки. Щоб зруйнувати зразок під час регулювання напруги, σ_1 зазвичай навантажують до штучно визначеного високого напруження перед розвантаженням, яке не визначається інженерними роботами [19]. Таким чином, траєкторії напруги, прийняті під час випробування, часто є неточними, тому важко з'ясувати механізм інженерного впливу, викликаного проведенням виробки. Крім того, не всі геологічні прояви в шахтних умовах викликані навколишньою породою, яка вступає в постпікову стадію відразу після проведення.

Коли максимальна девіаторна напруга перевищує напругу виникнення тріщини, тріщини вже виникли всередині [8]. Проведення виробки спричиняє перерозподіл напруги, і зі збільшенням відстані від межі вибою відбуваються різні коригування напруги та механічні реакції. Тим не менш, існує небагато досліджень механічної реакції порід під складними шляхами напруги при проведенні, а характеристики руйнування та механізм видавлювання підосви виробки, спричинені проведенням, залишаються неясними.

Проведений критичний аналіз літератури дозволив зупинитись на дослідженнях Wang та ін., які на перший погляд максимально відбивають описані вище напрямки сучасних досліджень деформування підосви і частково вирішують проблемні пункти, зазначені в цих дослідженнях.

Wang та ін [14] описують дослідження проведене в умовах тунелю що проводиться на глибині 650 м. На цій ділянці ґрунтових вод мало, а товща конгломерату діє як водотривкий шар, причому ґрунтові води не мають на нього великого впливу. Зворотня арка в виробці не була побудована, підосва зазнала відносно значних тріщин і зрушень після провдення протягом певного періоду часу. Таким чином загальні інженерні умови схожі на умови проведення виробок в ПРАТ ш/у Покровське.

За допомогою спостережень було виявлено різні характеристики пучіння підлоги в тунелі:

(1) Сильне пучіння підлоги. Після розкопок протягом певного періоду часу помітний розвиток тріщин спостерігається в центральній частині підосви тунелю. Первинна макроскопічна тріщина вирівнюється з віссю тунелю, охоплюючи кілька десятків метрів у довжину та змінюючись від кількох сантиметрів до десятків сантиметрів у ширину. Це супроводжується кількома незначними тріщинами шириною кілька міліметрів, які проходять під певними кутами до осі тунелю. Деформація підняття підосви тунелю перевищує 10 см (рис. 2а). Для подальшого дослідження механізму спучування підосви вертикальне буріння та відбір керна проводилися в двох середніх положеннях підосви секції тунелю. Керни містять щільні тріщини, відносно розбиті, і погано зцементовані (рис. 3.9а).

(2) Невелике підняття підосви. На підосві спостерігається первинна тріщина, що проходить по осі тунелю, довжиною кілька метрів і шириною менше 1 см. По обидва боки головної тріщини немає значних дислокацій, але численні кластери дрібних тріщин розподілені вертикально вздовж основної тріщини. Усі ці незначні тріщини мають довжину в межах 2 м. Величина підйому підосви в цій частині тунелю відносно невелика, на рівні сантиметра. Витягаючи керни з дна цієї ділянки тунелю, стає очевидним, що ядро породи має відносно добру цілісність і цементацію (рис. 3.9б).



а



б

Рисунок 3.9 – Керни з підшови виробки на ділянках великого (а) і невеликого (б) пучіння (Wang та ін [14]).

Керни породи були виготовлені на тонкі шліфи та піддані ідентифікації мікроструктури, як показано на рис. 3.10. Породи складаються в основному з піщаних, ілистих, кварцових і невеликої кількості карбонатних елементів. Цементний матеріал, який заповнює проміжки між уламками, складається в основному з глинистих гірських порід і невеликої кількості карбонатних мінералів і мусковіту. Глиниста фракція складається з різних глинистих мінералів, а залізисті мінерали — це переважно оксиди заліза, здебільшого змішані з глинистими фракціями, що робить наповнювач червоно-коричневим. Склад цементу в кожному типі подібні (хоча в першому варіанті вміст глинистих часток більше), а основні відмінності полягають у режимі контакту, вмісті цементу та ефективності цементації. Зокрема, перший тип породи (рис. 3.10 а) знаходиться в прямому контакті, з найменшою кількістю цементного матеріалу ($< 10\%$), що призводить до слабкої цементації, тобто

контактної цементації уламкової породи. Другий тип породи (рис. 3.10 б) складається порід, які утворюють каркас, в точковому контакті. Кількість цементуючого матеріалу (20-30%) помірна, і цементний матеріал заповнює інтерстиціальні пори, що призводить до помірної цементації, тобто пористої цементації один одного, а кількість цементного матеріалу ($> 50\%$) становить відносно значні, уламки гірських порід розсіяні всередині цементуючої матриці.

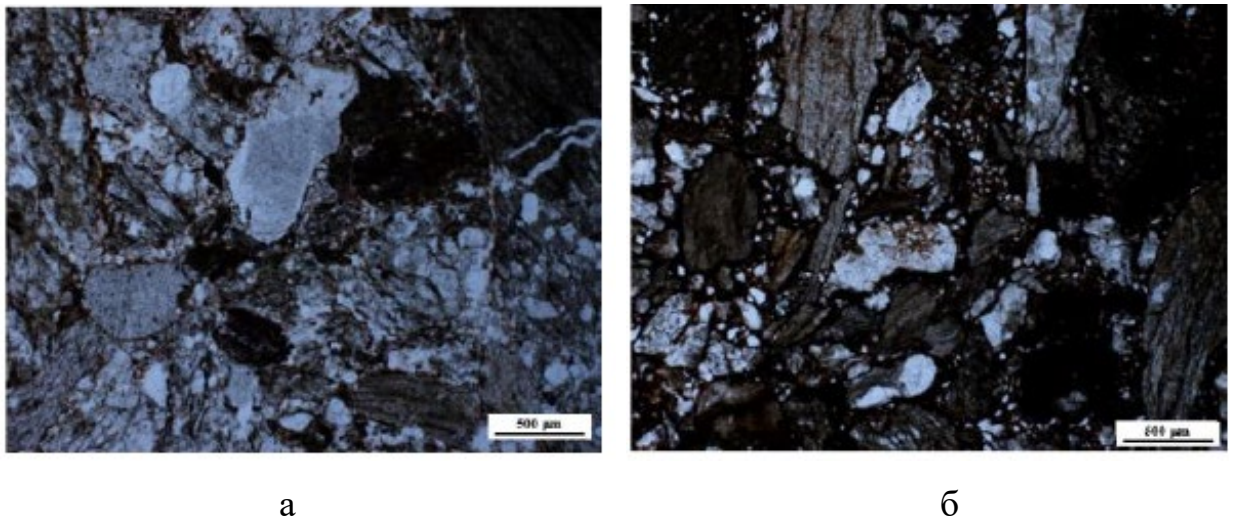


Рисунок 3.10 – Мікроскопічні фотографії породних шліфів (а) контактна цементизація, б) пориста цементизація

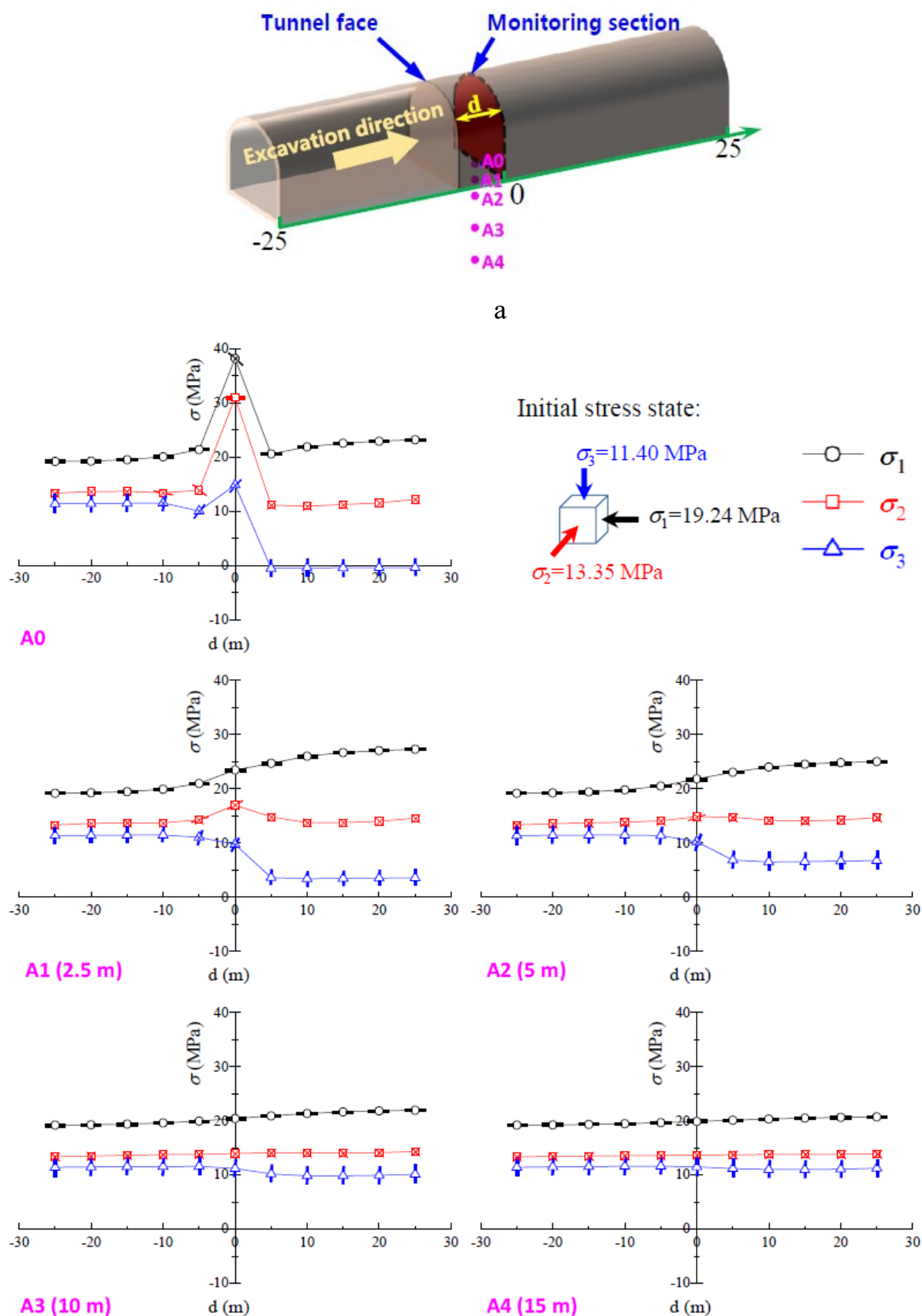
З наведеного випливає висновок, що тип цементизації і склад цементу впливає на несучу здатність підосви. Нажаль через військову агресію росії провести аналогічні дослідження в лабораторії ДонНТУ з породами підосви блоку 10 ПРАТ ш/у Покровське неможливо. В наявній геологічній інформації зазначено, що в підосві знаходиться алевроліт темно-сірий, з слюдой, горизонтальношаруватий, з відбитками флори середньої збереженості, з одиничними тріщинами відкритого типу під кутом 80-90 градусів. Вочевидь наявність слюди ще гірше впливає на стійкість порід підосви ніж глинистий цемент.

Другою новацією Wang та ін [14] є тривимірний аналіз траєкторії напруги під час проведення виробки. Щоб визначити зміни напруги в навколишній породі, викликані проходкою, авторами було проведено тривимірне моделювання процесу проходки тунелю за допомогою CASRock [20]. Розмір елемента було мінімізовано біля межі тунелю та поступово збільшено назовні. Тунель мав арочну форму. Прикладене напруження – це напруга, виміряна на місці ($\sigma_1 = 19,24$ МПа, $\sigma_2 = 13,35$ МПа та $\sigma_3 = 11,40$ МПа), де σ_2 – у напрямку виїмки, σ_1 – горизонтальний, а σ_3 – вертикальний. Для моделювання була обрана ізотропна пружна конститутивна модель із модулем пружності 4,5 ГПа та коефіцієнтом Пуассона 0,3. Тунель проходив повноперерізним способом зі швидкістю 5 м/крок.

Секція моніторингу встановлюється в середині напрямку розкопок моделі, і п'ять точок моніторингу розташовані на відстанях 0,1 м, 2,5 м, 5,0 м, 10,0 м і 15,0 м від підосви тунелю, відповідно, що представляє поверхню (A0), мілких (A1 і A2) і глибоких (A3 і A4) зон, як показано на рис. 3.11а.

Відповідно до величини коригування напруги, спричиненої виїмкою, діапазон у межах 2,5 м від межі виїмки позначається як приконтурні породи; Діапазон від 2,5 м до 10 м позначається як не глибокі породи, а більше 10 м від межі виїмки вважається глибокими породами. Після завершення розрахунку зміни напруги в контрольній точці, що відповідають кожному етапу виїмки, нанесені на рис. 3.11б.

Результати показують, що чим ближче грань, що просувається, до секції моніторингу, тим значніше коригування напруги. Зміни напруги незначні, коли наступаючий вибій знаходиться на відстані 10 м (один діаметр тунелю) від контрольної ділянки. Характеристики коригування напруги породи поверхні підлоги (A0) є наступними: коли вибій, що просувається, знаходиться близько до контрольної ділянки (від -5 м до 0), усі три основні напруги демонструють певний ступінь концентрації, а напрямки головні напруги зазнають складних змін.



6

Рисунок 3.11 – Дослідження шляху навантаження породи Wang та ін [14] (а) схема моніторингових точок, (б) результати моніторингу

Зокрема, при проходженні вибою через ділянку моніторингу напружений стан у точках спостереження ускладнюється, відбуваються не тільки зміни величин головних напружень, а й поворот напрямків головних напружень (σ_1 в точці A0 відхиляється на 41° , і σ_2 відхиляється на 90° відповідно до початкового напруженого стану, як показано на рис. 3.11b). Це миттєвий динамічний процес, який включає навіть вибухову напругу, яку зараз неможливо змоделювати. Крім того, девіаторне напруження в цьому стані ($d = 0$) незначно збільшується порівняно з тим, коли забій знаходиться далеко від контрольної ділянки ($d = 5$ м), і σ_3 більше в цьому стані, що не прискорює породу пошкодження і мало впливає на зразок. Таким чином, це дослідження зосереджено на відмінностях у напружених станах точок моніторингу підлоги до та після розкопок. Таким чином, загальні характеристики напруги приконтурних пород (A0) такі: σ_3 розвантажується до 0, σ_1 навантажується, а σ_2 є незначно розвантаженим. Характеристики регулювання напруги неглибоких порід (A1 і A2) під час виїмки такі: σ_3 поступово розвантажується, σ_1 навантажується поступово, а σ_2 трохи збільшується. Напруги глибокої породи (A3 і A4) менш залежать від виїмки і мають тенденцію до початкового напруженого стану.

Отримані результати є цікавими, оскільки свідчать, що різні ділянки підосви витримують знаходячись ще в масиві, по мірі просування вибою різні напруження, причому такі напруження мають не тільки різну величину, а й навіть знак. Тобто ще до моменту потрапляння конкретної ділянки порід в підосву виробки, породи можуть руйнуватись як стискаючими так і розтгуючими і зсувними напруженнями.

Проведене дослідження Wang та ін [14] відкриває новий підхід до аналізу напруженого стану порід підосви виробок. Проте перенести його результати на умови блока 10 ПРАТ ш/у Покровське неможливо. Але цілком можливо провести дослідження в схожих режимах для гірничо-геологічних умов по трасі 10 півн. «біс» конвеєрного штрека.

Оскільки лабораторні дослідження в лабораторії ДонНТУ обмежені через руйнування лабораторій в 2 корпусі університету, а шахтні дослідження в умовах ПРАТ ш/у Покровське недоступні, єдиним можливим і доцільним методом дослідження в магістерській роботі залишається метод комп'ютерного моделювання.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел дозволив визначити перспективний напрямок дослідження – визначення шляху навантаження пород підосви при проведенні штреків. А також метод дослідження – метод комп'ютерного моделювання.

4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДНЯТТЯ ПІДОШВИ

4.1 Обґрунтування параметрів моделі. Схема чисельного експерименту.

В якості методу моделювання обрано метод комп'ютерного моделювання. Розрахунок конструкцій є одним із основних універсальних завдань усіх інженерних розрахунків, у тому числі й у геомеханіці. При цьому багато в чому запозичуються відомі класичні рішення методів будівельної механіки та опору матеріалів. Особливістю дослідження геомеханічних процесів є широке поширення фізичного та математичного моделювання. Математичне моделювання, що реалізується за допомогою аналітичних та чисельних методів, є одним з основних інструментів, що дозволяють досліджувати напружено-деформований стан породного масиву при вирішенні завдань гірничої геомеханіки, що дозволяє отримувати якісні характеристики та кількісні залежності. При цьому аналітичні методи ґрунтуються на значному спрощенні розв'язуваних завдань та вимагають наявності розвиненого математичного апарату. Так, наприклад, отримати аналітичне рішення задачі розподілу напруг і деформацій навколо гірничої виробки складної конфігурації в об'ємній постановці при наявності шарів порід з різними властивостями, а також областей непружних деформацій і зруйнованих порід є складним, і часто нерозв'язним завданням. Тому в геомеханіці останнім часом широко використовуються чисельні методи моделювання, які мають ширші можливості і отримали новий поштовх до розвитку з появою високошвидкісних комп'ютерів [21].

Постійний розвиток засобів обчислення, програмного забезпечення призвело до того, що практично всі сучасні розрахунки на міцність проводять, використовуючи метод кінцевих елементів (МКЕ), що реалізується у різних програмних пакетах. Пояснюється це тим, що:

1. Розрахункові схеми об'єктів, що моделюються, мають риси реального об'єкта, не потрібно їх спрощення до стандартних рішень опору

матеріалів і будівельної механіки, можуть бути деталізовані з необхідним ступенем точності в потрібних місцях

2. Для МКЕ характерна наочність процесу та висока якість візуалізації,

3. Проведення чисельного моделювання не вимагає високої математичної підготовки, може проводитись інженером-користувачем на підставі посібників та інструкцій програмного продукту. При цьому інженер, який проводить моделювання, розуміє специфіку розв'язуваного завдання з практичної точки зору, не допускає помилок інтерпретації математичних результатів, що дозволяє проводити коригування моделі відповідно до конкретних умов і отримувати грамотні інженерні рішення [21].

Розрахунки на основі припущення про лінійну пружність матеріалу є найбільш поширеними при розрахунку конструкцій та аналізі міцності. Лінійно-пружний матеріал підпорядковується співвідношенням закону Гука і зберігає деформації після зняття навантаження. При моделюванні геомеханічних процесів необхідно враховувати той факт, що коректне їх опис не може бути досягнуто за допомогою рішення лінійних пружних завдань. Крім того, більшість геомеханічних процесів нелінійні за своєю природою і не можуть бути вирішені чисто в статичній постановці. Причинами нелінійної поведінки є: фізична нелінійність геоматеріалів, під якою розуміється непропорційність властивостей між напруженнями і деформаціями, наявність контактів і тертя між елементами моделі, різні властивості елементів, а також геометрична нелінійність розв'язуваних завдань, обумовлена великими переміщеннями, що відповідають розмірам об'єктів, що моделюються, що не дозволяє приймати гіпотезу початкового недеформованого стану розрахункової схеми у процесі навантаження. Розв'язання задач з фізикою та геометричною нелінійністю в МКЕ проводиться, як правило, ітераційними методами Ньютона-Рафсона та Ньютона-Канторовича. При цьому матриця жорсткості уточнюється на кожній ітерації за допомогою лінеаризації. Рішення зводиться до послідовного наближення до функції, що шукається, а процес обчислень закінчується після досягнення заданої точності рішення.

Сучасні спеціалізовані програмні продукти містять у своїх модулях набір деформаційних моделей, що дозволяють досліджувати поведінку матеріалів, що підкоряються різним фізичним законам (гіперупругість, в'язкопружність, кінематичне зміцнення, ізотропне зміцнення, повзучість та ін.). Стосовно завдань геомеханіки для моделювання поведінки ґрунтів, гірських порід і бетону викликає інтерес пружнопластична модель, що використовує рівняння стану Мора-Кулона або Друкера-Прагера (побудована на наближенні до закону Мора-Кулона у вигляді конічної поверхні), застосування якої дозволяє отримати більш точне наближення до реальних результатів [22].

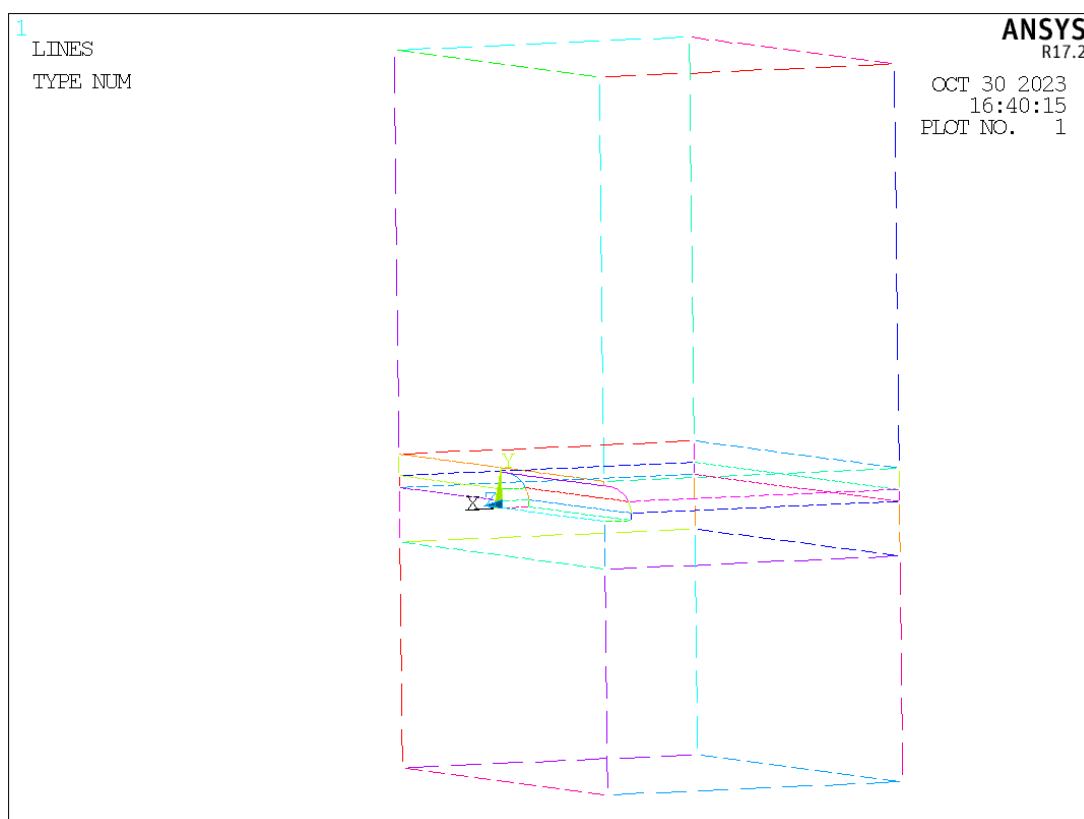
У роботі в якості основного методу досліджень використовувалося математичне моделювання, яке було реалізовано в програмній системі кінцево-елементного аналізу ANSYS. В основу програмного комплексу ANSYS покладено найбільш апробований і популярний метод вирішення складних багатофакторних задач, досить добре адаптований для вирішення завдань геомеханіки – метод кінцевих елементів, який заснований на спрощення гладких функцій дискретно лінійними поліномами і поданні досліджуваної області у вигляді плоских або просторових елементів [23].

В якості моделі для досліджень було прийнята виробка, що відповідає за параметрами штреку блока 10, детально описаному в розділі 2 магістерської роботи. Гірничо-геологічні умов є середніми по трасі виробки.

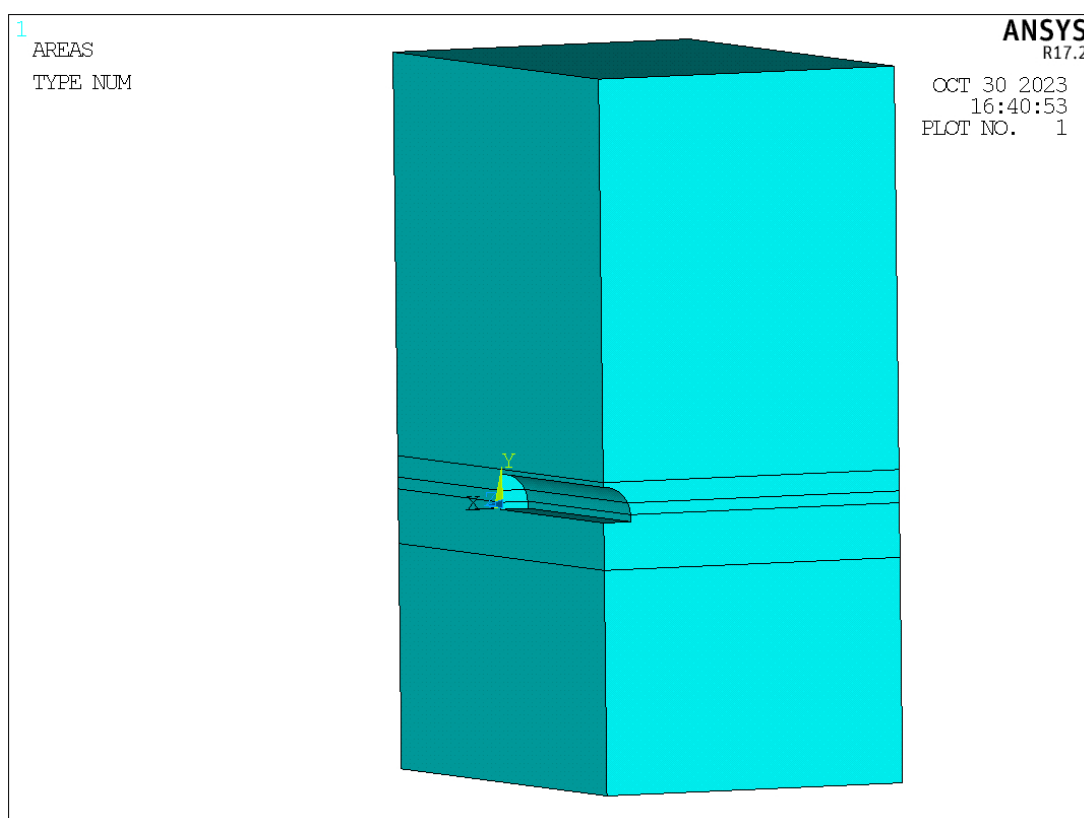
Задача вирішувалась в об'ємній (3D) постановці, що є обов'язковою умовою завдання поставленого в попередньому розділі магістерської роботи. Такий підхід дозволяє аналізувати еволюцію напружень навколо виробки в двох взаємно перпендикулярних перетинах, (в повздовжньому і в поперечному перерізі виробки).

Моделювання виконувалось в напрямку знизу вгору – від точок до об'ємів. Для цього в Автокаді було створено об'ємну модель масива порід в якому було проведено виробки. Після того координатні точки, що утворюють відповідні фігури були зчитані і введені в Ансіс. Після чого на точках було

побудовано лінії (рис. 4.1а), на лініях – поверхні, а на поверхнях об'єми моделі (рис. 4.1б).



а



б

Рисунок 4.1 – Схема моделі в моделі в лініях (а) і об'ємах (б)

Граничні умови були прийняті стандартними для подібних задач. Розмір моделі 100м x 60 ч 60 м. Задача вісесеметрична, тому моделюється половина перетину. Система силових умов на межах моделі - «прозорий ящик».

Після створення моделі гірничого масиву кожному шару моделі було задано фізико-механічні властивості порід, що відповідають структурній колонці (див. розділ 2). Контактні поверхні між шарами задавались автоматично.

Створена модель була поділена на кінцеві елементи автоматично з використанням влаштованого внутрішнього модуля системи. При цьому за формою моделі автоматично було обрано оптимальну форму і розміри кінцевих елементів. Форма була встановлена у вигляді тетраедрів (рис. 4.2).

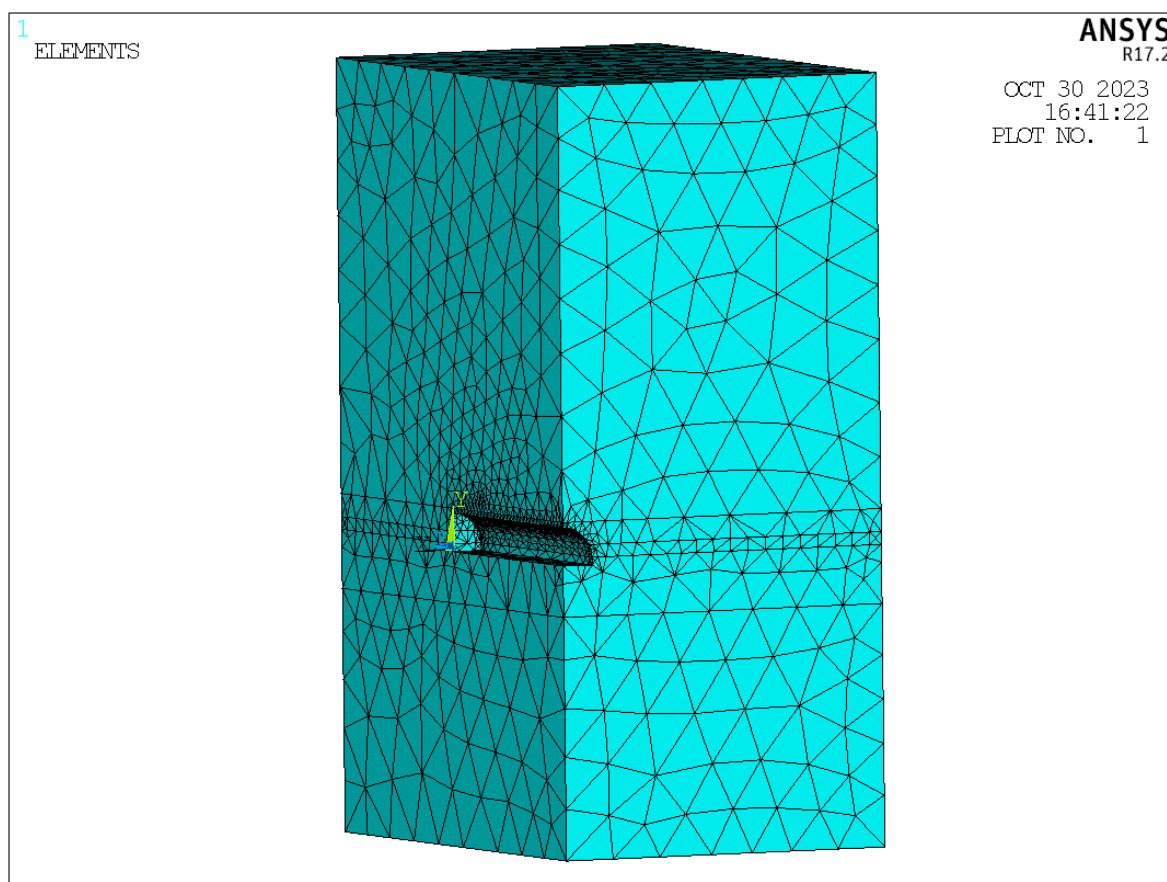


Рисунок 4.2 – Модель поділена на кінцеві елементи в автоматичному режимі

Після генерації сітки в автоматичному режимі було протестовано модель на наявність геометричних помилок. Таких помилок не було виявлено. Після чого було проведено оптимізацію сітки в ручному режимі.

Для цього шари, що імітували породи безпосередньої підосви, основної підосви і вугільного пласта були перерозбиті в ручному режимі з зміною форми кінцевих елементів. Процедура оптимізації сітки наведена на рис. 4.3.

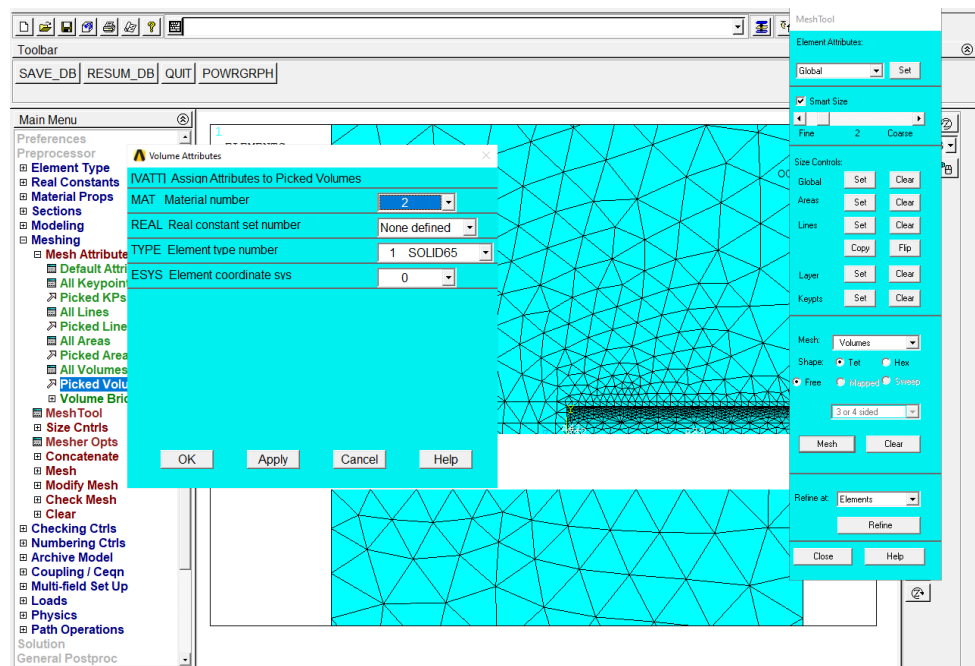


Рисунок 4.3 – Процедура оптимізації сітки кінцевих елементів в ручному режимі

Додатково було проведено уточнення сітки в зоні дослідження – в підосві штреку попереду і позаду вибою. Сітка розбивалась в цих зонах вручну через задання мінімально можливого розміру кінцевого елемента в межах геометрії моделі. Для пласта і порід основної підосви було замінено форму кінцевих елементів на паралелепіпед, що дозволяє більш якісно віддзеркалювати процес. Нажаль породи безпосередньої покрівлі не вдалося розбити на прямокутні елементи, через наявність в цьому шарі підосви виробки арочної форми, що зумовлювало помилку топології моделі. В шарі,

що імітує породи підосви було мінімізовано сітку елементів на відстані 8м перед вибоєм і 10 м за вибоєм. Це дозволяє отримати більш коректні результати розподілу напружень і деформацій, оскільки розрахунок ведеться в вузлах моделі і інтерпретується методом ітераційного сглажування на між вузлові простори. Порівняння сіток кінцевих елементів створених в автоматичному і ручному режимі наведено на рис. 4.4.

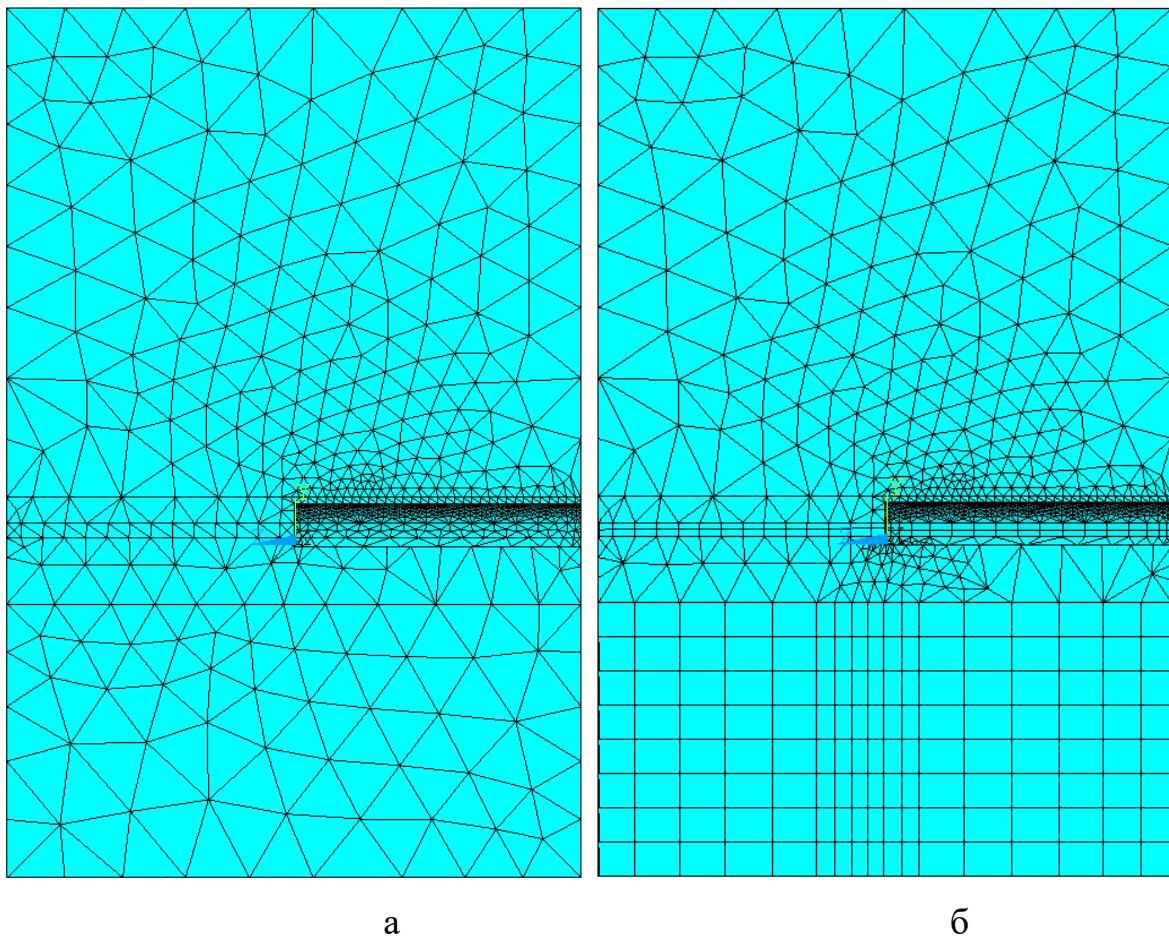
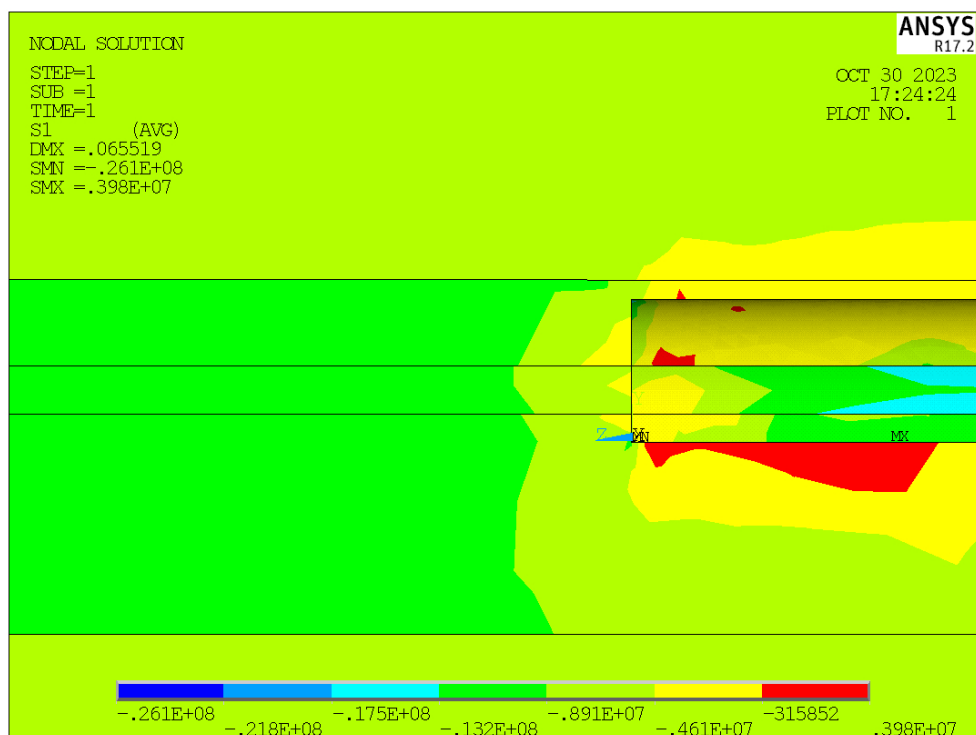


Рисунок 4.4 – Сітки кінцевих елементів і досліджуваній області: (а) автоматичне розбиття, (б) оптимізована схема розбиття

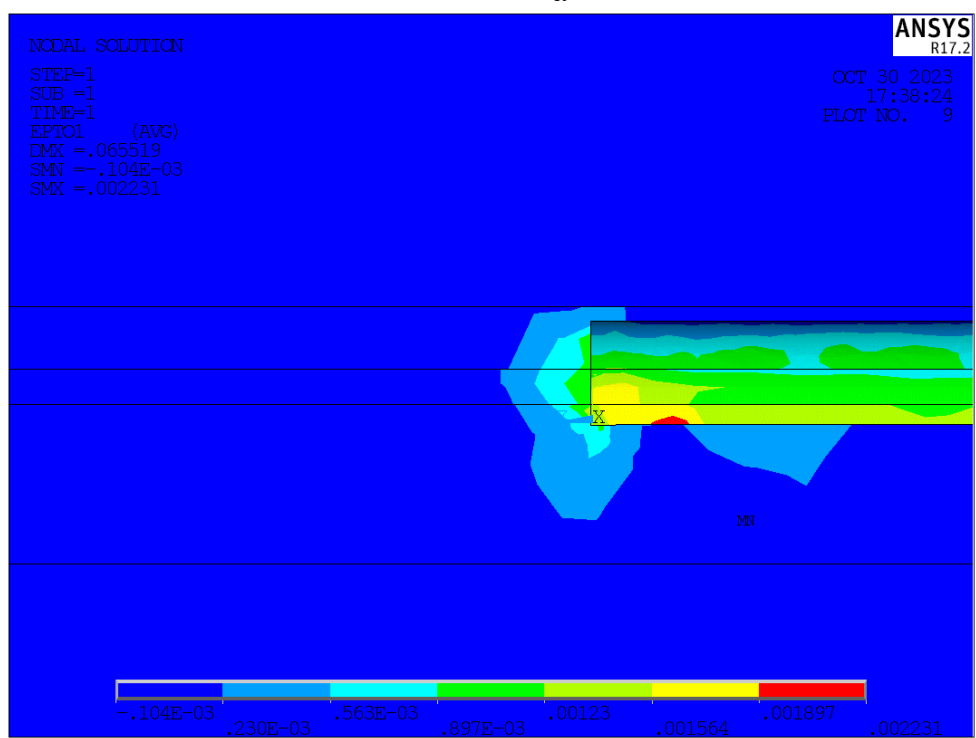
До вертикальної межі моделі прикладались тискові навантаження, що відповідають гравітаційним напруженням в масиві на глибині проведення штреку. Після чого модель тестувалась на наявність помилок. помилок не було виявлено, етап підготовки моделі було завершено.

4.2. Результати математичного моделювання

Результати розрахунку максимальних головних напружень і відповідальних ним відносних деформацій наведено на рис.4.5.



a



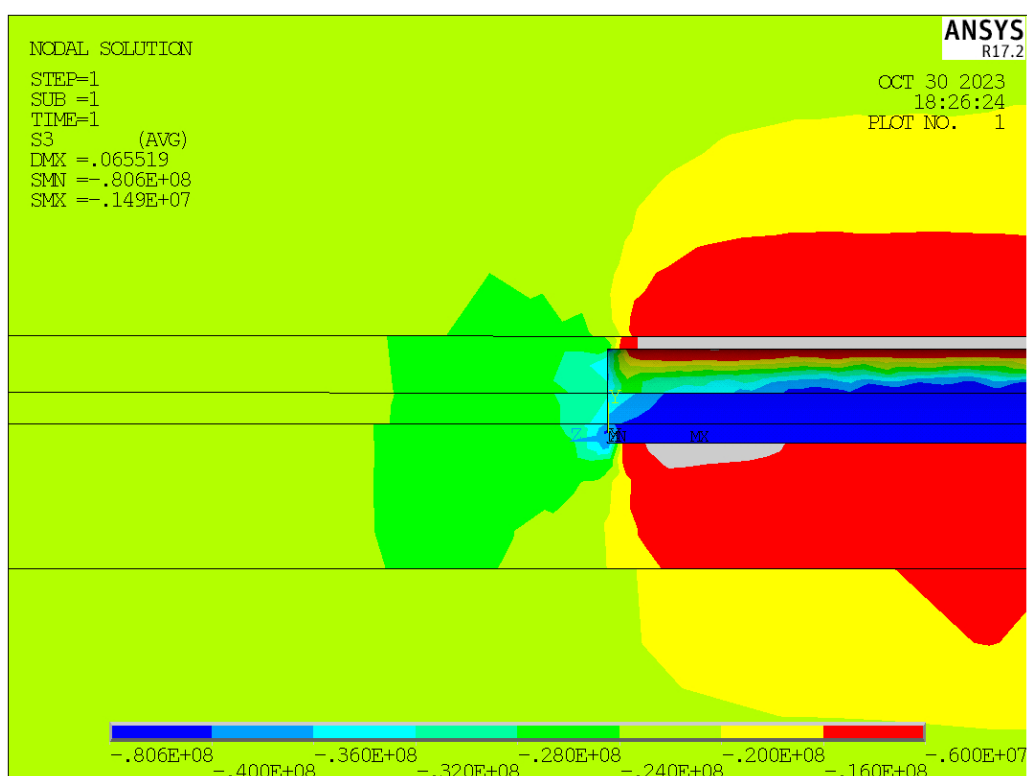
б

Рисунок 4.5 – Поля розподілу головних максимальних напружень (a) і головних максимальних деформацій навколо виробки

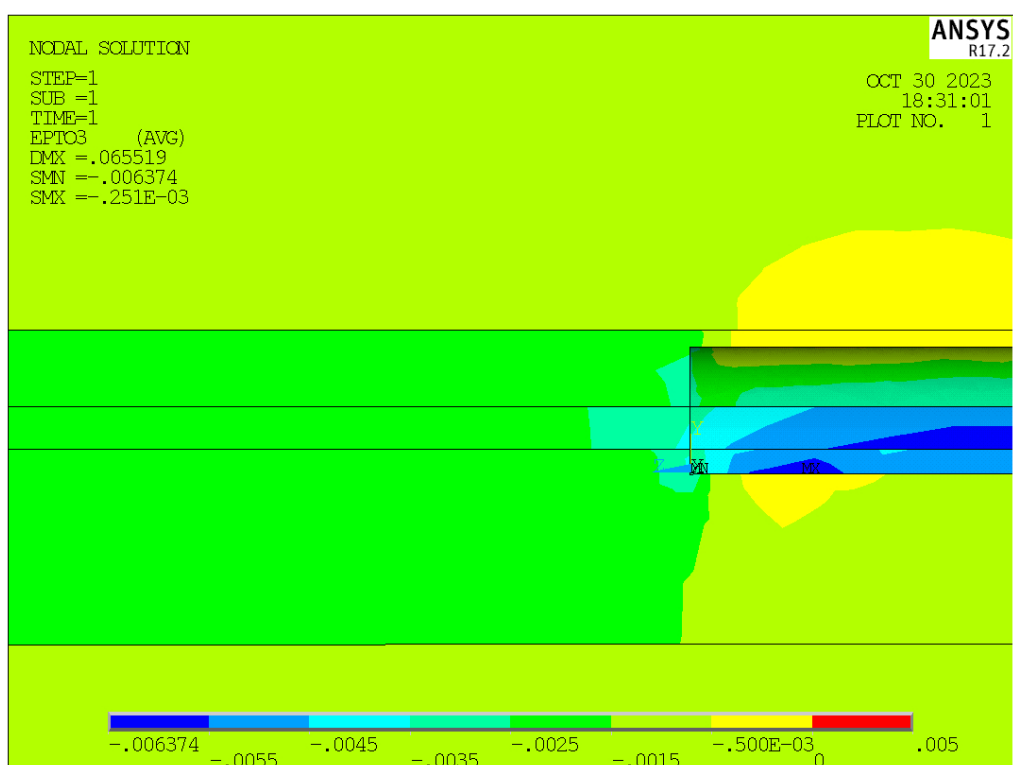
Аналіз результатів моделювання (рис. 4.5) дозволяє оцінити розподіл максимальних напружень. Зокрема можна дійти висновку, що перед вибоєм штрека формується зона підвищених напружень, яка в тому числі вміщує породи покрівлі і породи підосви. Очевидно в цій зоні природні напруження, визначені гравітаційними силами підвищуються, тобто породи стискаються. Що видно також по рис. 4.5 б, аналізуючи розподіл відносних деформацій. В підосві штрека вже на відстані 1,5-2,0 м виникає зона розвантаження (понижених напружень). Ця область позначена червоним кольором на рис. 4.5 а. Зона розвантаження зростає і в розмірах і в по величині напружень. Таким чином, максимальні розтягуючі напруження, що виникають в підосві штреку досягають 3,9 МПа, тобто перевищують межу міцності порід підосви на розтягування. Аналогічний висновок можна зробити аналізуючи розподіл відносних деформацій, що відповідають максимальним головним напруженням.

Результати розрахунку мінімальних головних напружень і відповідаючих ним відносних деформацій наведено на рис.4.6. Оскільки мінімальні головні напруження (мінімальні з врахуванням знаку, а не модуля) є стискаючими, аналізуючи картини їх розподілу можна оцінити розміри зони концентрації підвищених напружень. Така зона формується перед вибоєм штреку (має темно-зелене і блакитне забарвлення). Максимальний розмір цієї зони перед штреком становить $2,1 \cdot$ висоту виробки. Весь шар безпосередньої підосви потрапляє в цю зону, тобто породи стискаються в ній з напруженнями на 25-35 відсотків перевищуючих природне поле напружень. Такий висновок підтверджується результатами аналізу розподілу мінімальних відносних деформацій (рис. 4.6 б). Зона розвантаження, судячи з аналізу деформацій формується в підосві штрека на відстані 1,5-2,0м від вибою.

Оскільки оцінка стійкості порід покрівлі в межах магістерської роботи не проводиться, аналізувати відповідні перевищення межі міцності не має сенсу. Зосередимось на аналізі напружень і деформацій в підосві штреку.



а



б

Рисунок 4.6 – Поля розподілу головних мінімальних напружень (а) і головних мінімальних деформацій навколо виробки

Загальну оцінку деформаційного стану при контурного масиву навколо штрека можна зробити на основі аналізу еквівалентних загальних відносних деформацій (рис. 4.7). Розміри зон деформацій стиснення і розтягування можна оцінити по забарвленню, що відрізняється від темносинього кольору. Знов візуалізуються зони стиснення перед вибоєм штрека і розтягування - в підшві з вибоєм штрека.

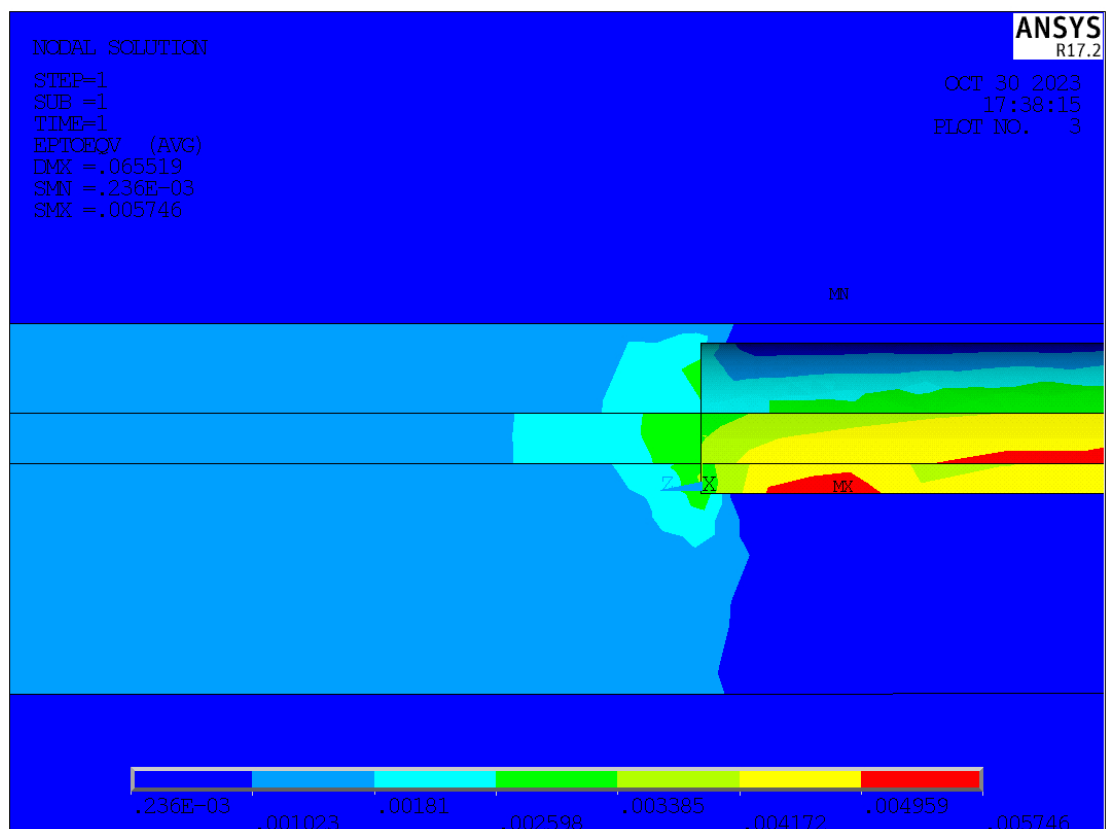
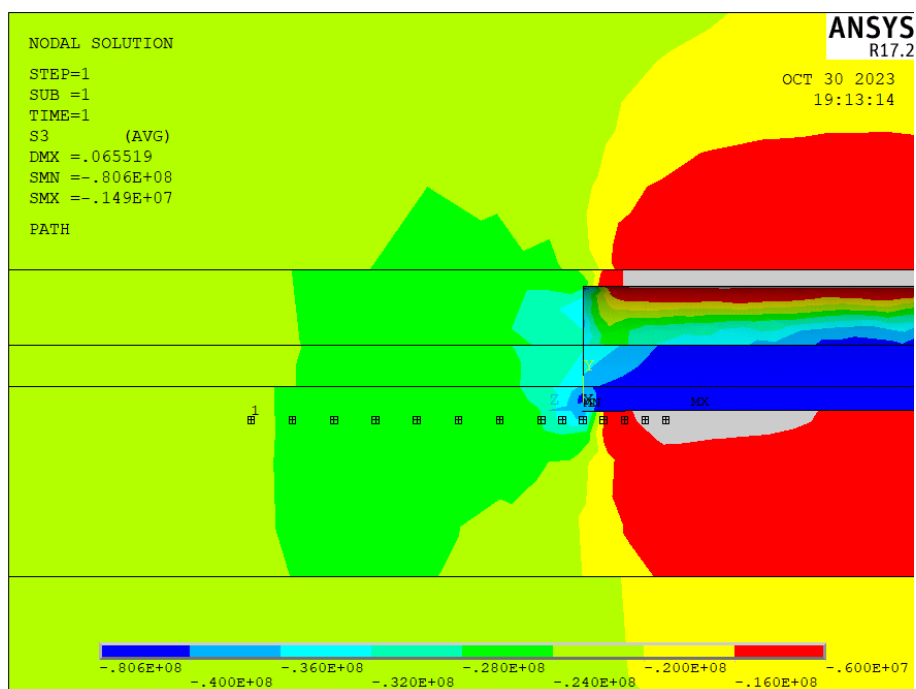
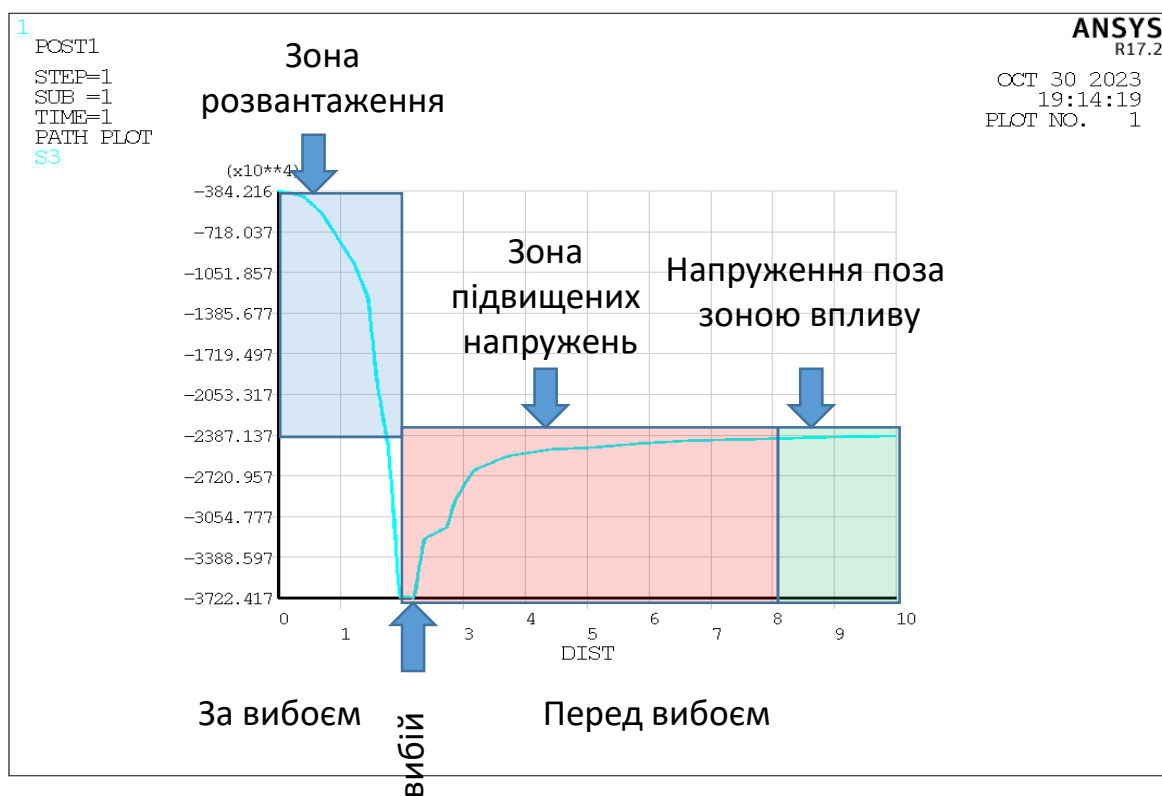


Рисунок 4.7 – Поля розподілу еквівалентних (сумарних) відносних деформацій навколо штрека

Надати чисельну оцінку зміні напружень можна через побудови графіків зміни напружень по профільним лініям глибин в підшві штрека. В якості приклада на рис. 4.8 наведено інтерпретацію математичного моделювання на графік мінімальних головних напружень в моделі, побудований по профільній лінії, що орієнтована в підшві пласта (0,25 м нижче підшви) вздовж траси виробки (рис. 4.8а).



а



б

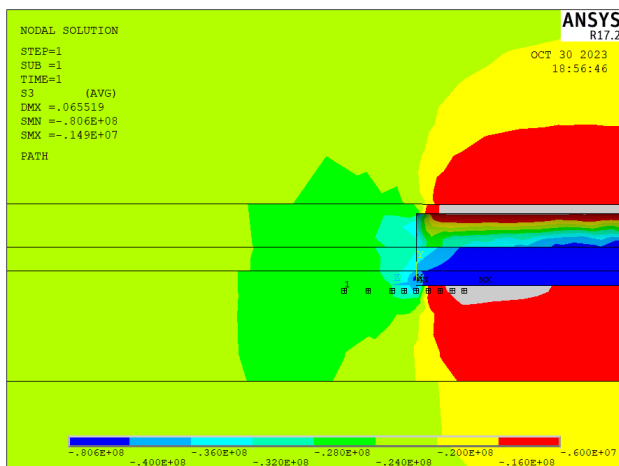
Рисунок 4.8 – Лінія зчитування результатів розрахунку напружень з моделі на картині розподілу головних мінімальних напружень (а) і відповідна крива зміни напружень (б)

Шлях аналізу напружень (профільна лінія позначена точками. Враховано ділянку 8 м перед вибоєм і 2,0 м за вибоєм.

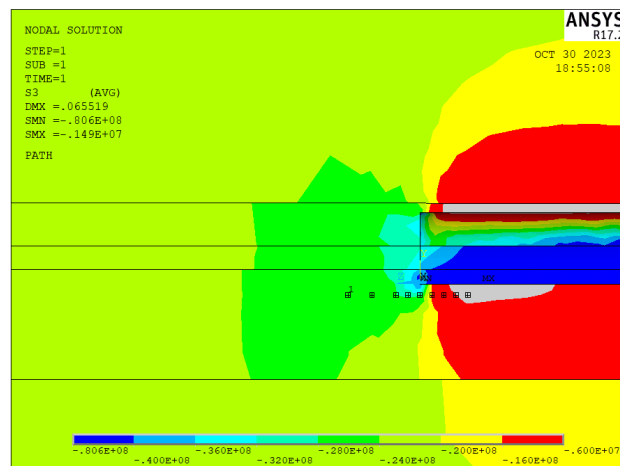
Аналізуючі графік напружень перед і після виробки можна дійти висновків:

- на відстані 8 м перед вибоєм штреку поле напружень відповідає гравітаційній складовій, ефективні напруження – 23,8 МПа;
- зона впливу виробки починається на відстані 8,0м перед вибоєм. Напруження зростають в ній від 23,8 до 37,2 МПа – під створом штрека. Тобто напруження збільшуються на 56 %;
- зона розвантаження починається одразу за створом вибоя штрека. В ній напруження різко знижуються. На відстані 2,0м за вибоєм в підосві на глибині 0,25м напруження становлять 3,8 МПа, тобто відбувається розгрузка на 84% відносно початкового поля напружень і на 90% відносно максимальних концентрацій.. Таким чином породи підосви завантажуються циклічно: навантаження-розвантаження. При цьому знак напружень змінюється.

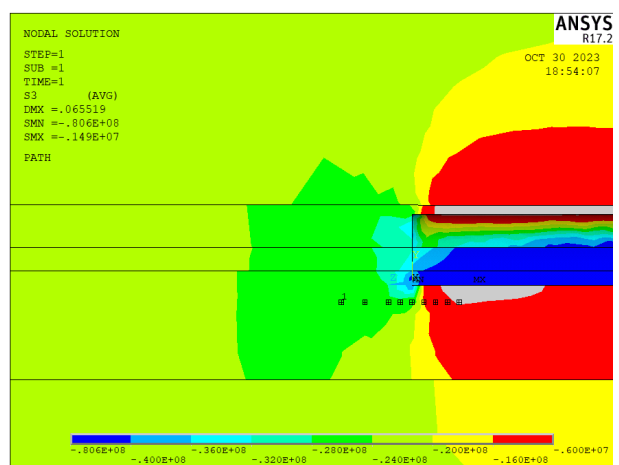
Для відстеження зміни напружень по глибині були побудовані 4 профільні лінії для зняття напружень з моделі. Такі лінії (шляхи напружень) прокладені в підосві штреку вздовж траси виробки на відстані від підосви 0,25, 0,5, 0,75, 1,0м. Положення профільних ліній показано на рис. 4.9 а-г. Довжини профільних ліній обмежені довжиною 5,0м перед вибоєм і 2,0 м за вибоєм штреку. Графіки відповідних напружень наведені на рис. 4,9 д-і.



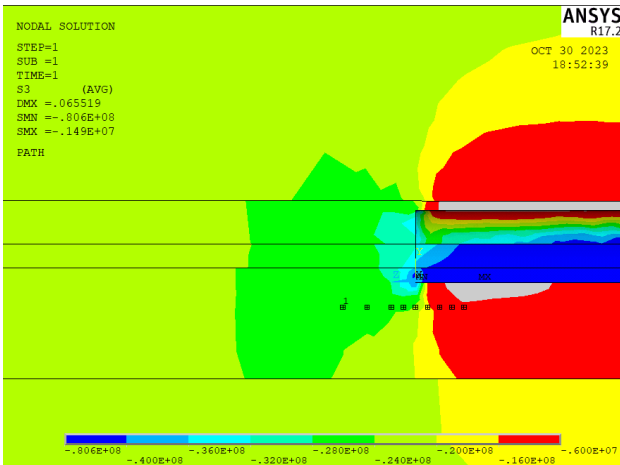
a



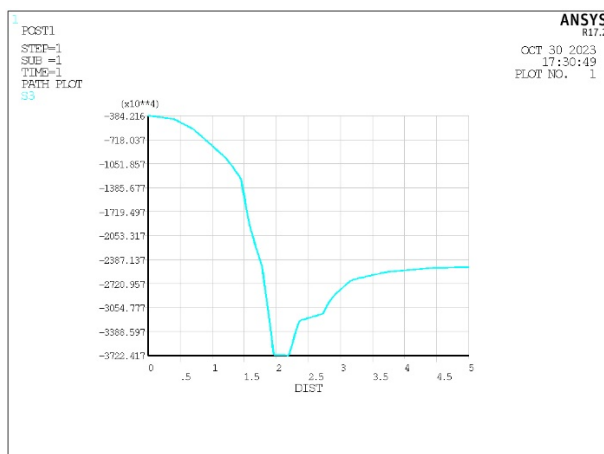
б



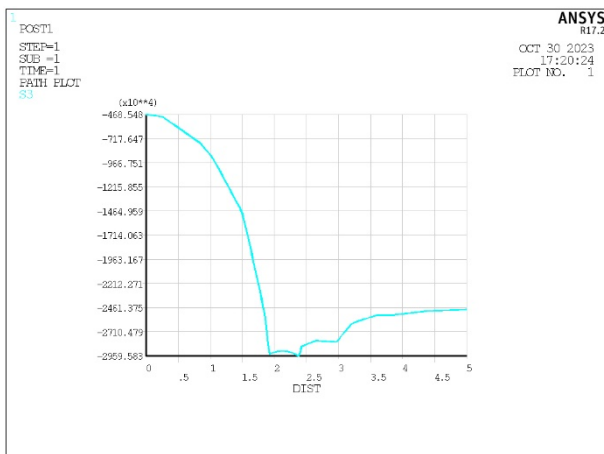
B



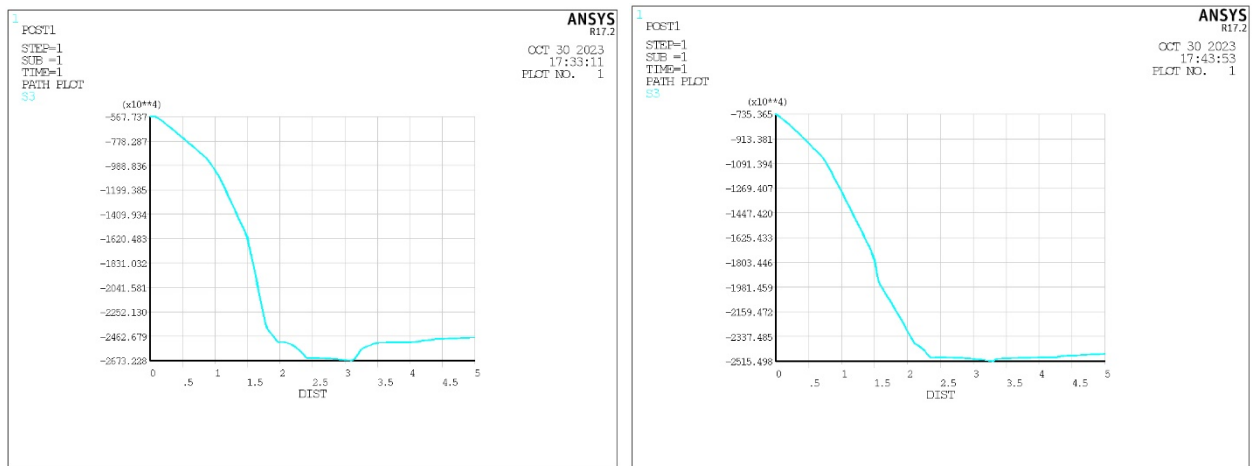
Г



Д



Ж

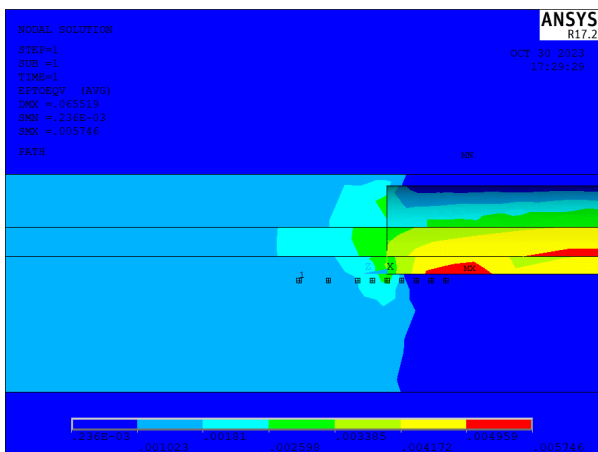


3

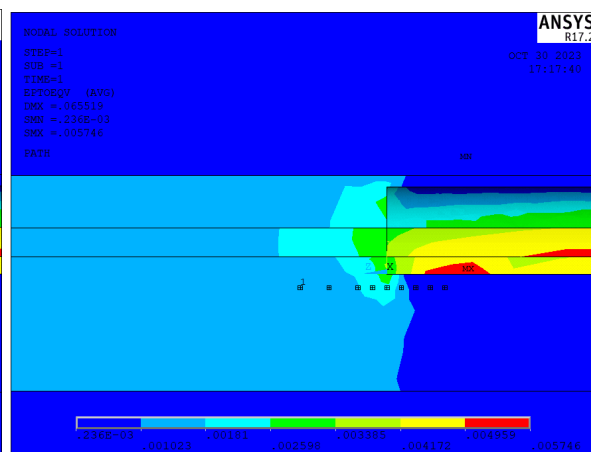
i

Рисунок 4.9 – Лінії зчитування результатів розрахунку напружень з моделі на картинах розподілу головних мінімальних напружень на відстані 0,25м (а), 0,5м (б) 0,75м (в), 1,0 м (г) від підшви штрека і відповідні криві зміни напружень (д-і)

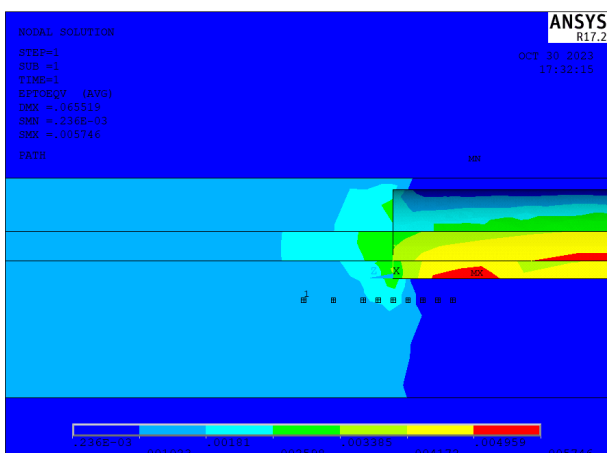
Аналізуючі головні мінімальні напруження можна дійти висновку, що зона підвищених напружень перед вибоєм штрека в підшві виробки обмежується глибиною 1,0м. Оскільки в цьому варіанті підвищені напруження не виникають. До того ж абсолютні значення напружень перед вибоєм з глибиною зменшуються. Аналогічних висновків можна дійти і для зони порід підшви за вибоєм. Збільшення вертикальної відстані від підшви сприяє зменшенню зони розвантаження. Так на глибині 1,0 м (коли зона підвищених напружень не виникає) напруження в зоні розвантаження на відстані 2,0м за створом вибою становлять 7,35 МПа, тобто зменшуються на 70%. Тобто зона розвантаження характерна для всього обраного діапазону глибин. Аналіз відносних деформацій можна провести на основі розподілу головних еквівалентних деформацій на відстані 0,25м (а), 0,5м (б) 0,75м (в), 1,0 м, наведеного на рис. 4.10.



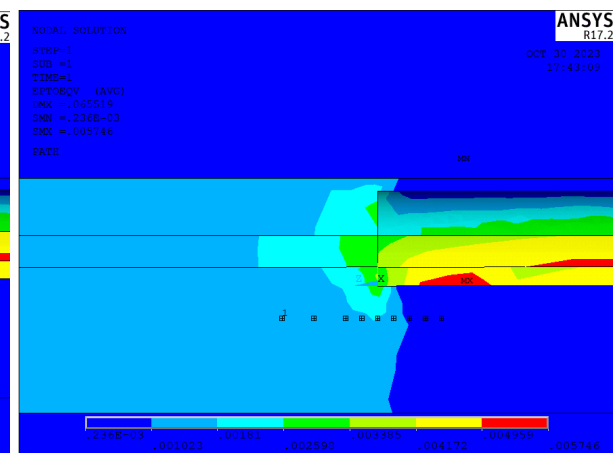
a



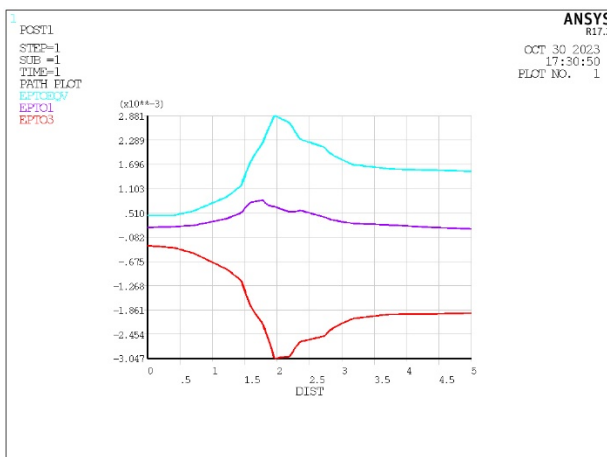
б



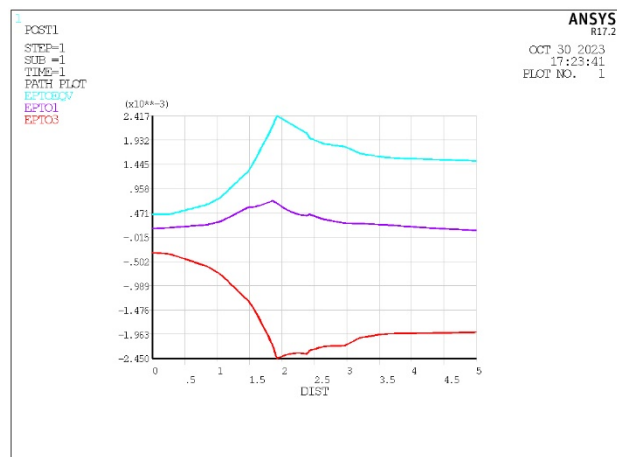
в



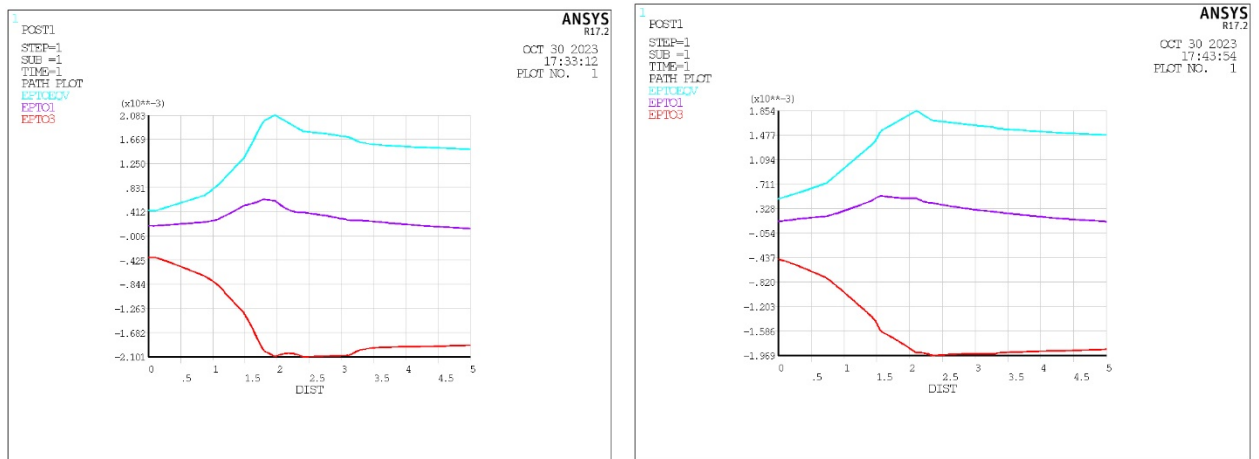
г



д



ж



3

i

Рисунок 4.10 – Лінії зчитування результатів розрахунку відносних деформацій з моделі на картинах розподілу головних еквівалентних деформацій на відстані 0,25м (а), 0,5м (б) 0,75м (в), 1,0 м (г) від підшви штрека і відповідні криві зміни деформацій (д-і)

Зміна виду деформацій (розтягування-стиснення) підтверджує наведені вище висновки. Також можна зробити аналогічні висновки по розмірам зони впливу перед і за вибоєм штрека (червона лінія на графіках). Абсолютна величина і флуктуації відносних деформацій також змінюються. Так на відстані 0,25 в підшви виробки деформації тиску збільшуються на 60%, в зоні концентрації напружень і зменшуються на 87% в зоні розвантаження. А на відстані 1,0м відповідні показники становлять 9%, 77%.

Висновок щодо знакозміненості напружень і деформацій підтверджується. Тобто підхід описаний в роботах аналогів китайських прохідницьких вибоїв підтверджується в українських реаліях.

Відомо, що циклічне навантаження порід призводить до суттєвого зниження їх межі міцності вже після першого циклу.

Міцність породи під циклічним навантаженням зазвичай показує очевидний ефект швидкості деформації. Деякі вчені вважають, що це пов'язано зі зміною від одновимірного напруженого стану до одновимірного деформованого стану породи. Крім того, утворення та розширення

мікротріщин також вважаються важливою основою. На стадії пружного деформування гірської породи при циклічному навантаженні і розвантаженні в зразку починають з'являтися тріщини і дефекти, які впливають на поширення хвиль напружень.

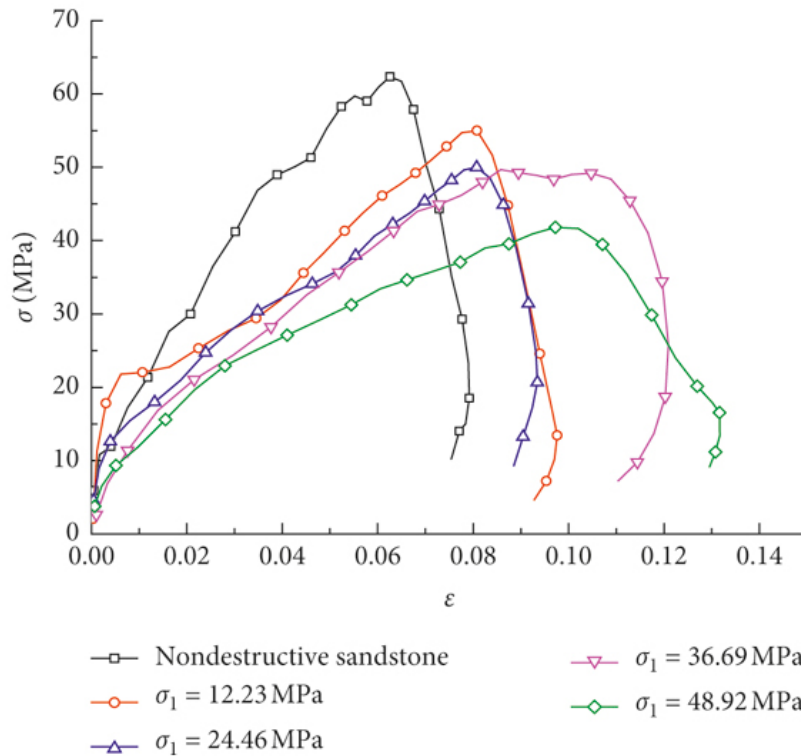


Рисунок 4.11 Зміна міцності пісковика з різним ступенем попереднього одноциклічного завантаження-розвантаження [24]

Деформації мікротріщини в породі швидко накопичуються за дуже короткий час. У порівнянні з неушкодженим пісковиком слабкі площини, такі як шви та тріщини, послаблюють поширення хвиль напруги. Крім того, руйнування гірської породи спричинене розширенням деяких тріщин. Під дією навантаження тріщини в пошкодженному пісковику можуть швидко зруйнувати скелю і потребують менше енергії, і чим більший ступінь пошкодження, тим менша енергія потрібна. Тому міцність пошкодженого пісковика при навантаженні нижча, ніж міцність непошкодженого пісковика. Зміну міцності пісковика з різним ступенем пошкодження під впливом циклічного навантаження показано на рис. 4.11.

Схожа картина спостерігається і при навантаженні інших порід [25].

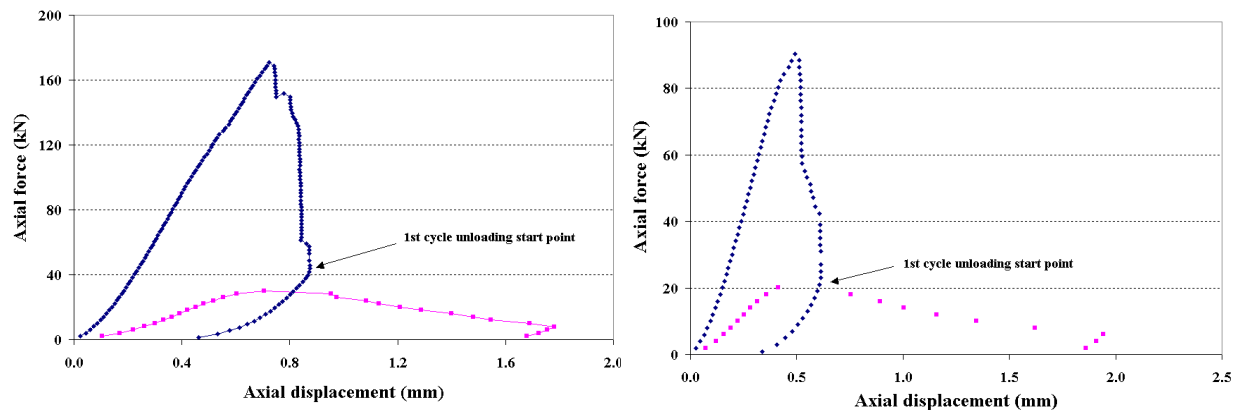


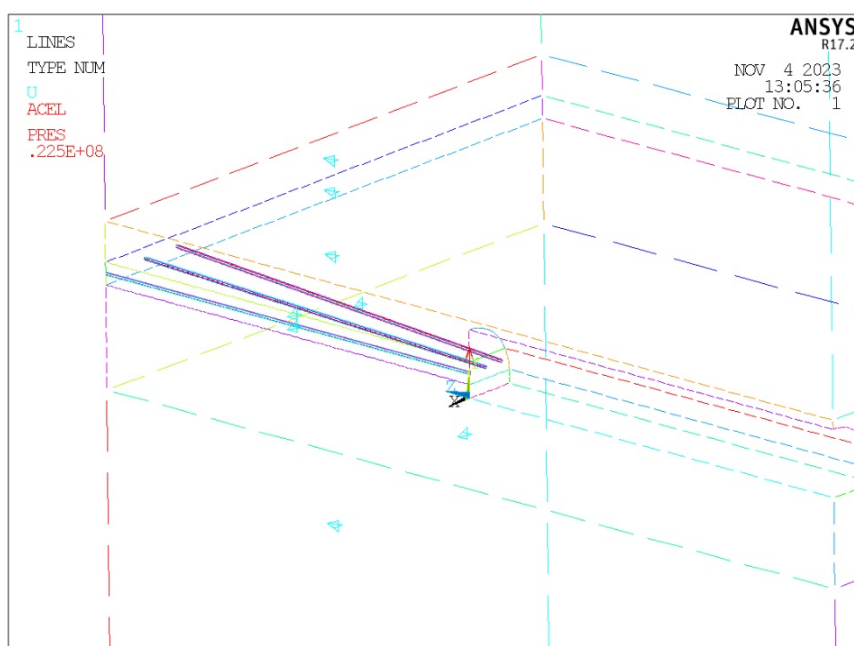
Рисунок 4.12 Зміна міцності після попереднього одноциклічного завантаження-розвантаження [25]

4.3 Дослідження способу зниження напружень в масиві розвантажувальними свердловинами

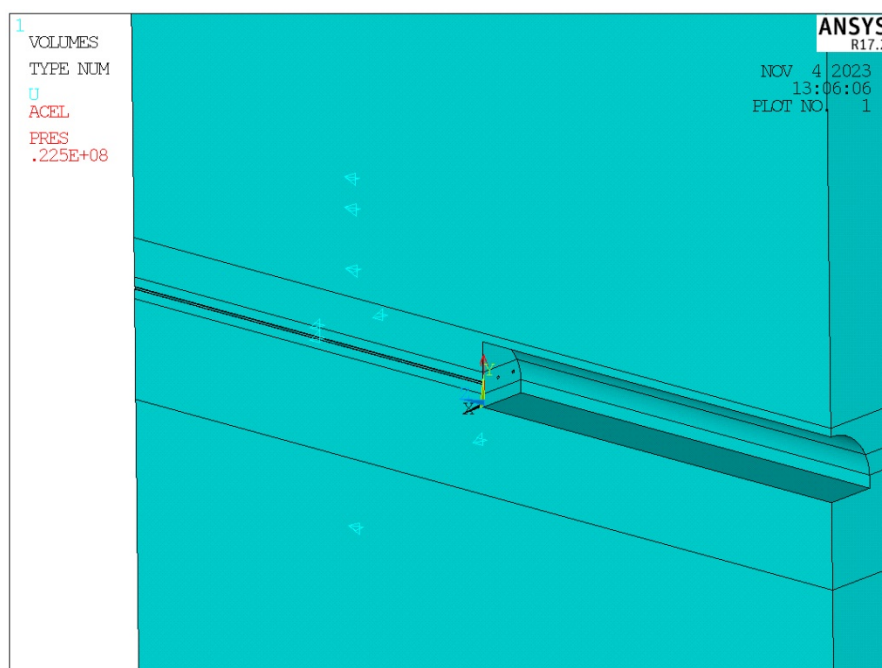
Як відомо є два напрямки управління гірничим масивом – керування напруженнями (за рахунок штучної зміни напружень в масиві) підвищення несучої здатності порід (за рахунок їх кріплення, зміцнення).

Було проведено дослідження можливості розвантаження напружень в підшві шляхом вибурювання випереджаючих розвантажувальних свердловин, за аналогією способу охорони штреків розвантажуючими свердловинами, тільки з різницею в напрямку буріння (не в боки, як в відомій технології, а в напрямку просування вибою).

Результати моделювання представлені на рис. 4.13-4.14. Схема моделі в лініях наведена на рис. 4.13а і об'ємах на рис. 4.13 б.

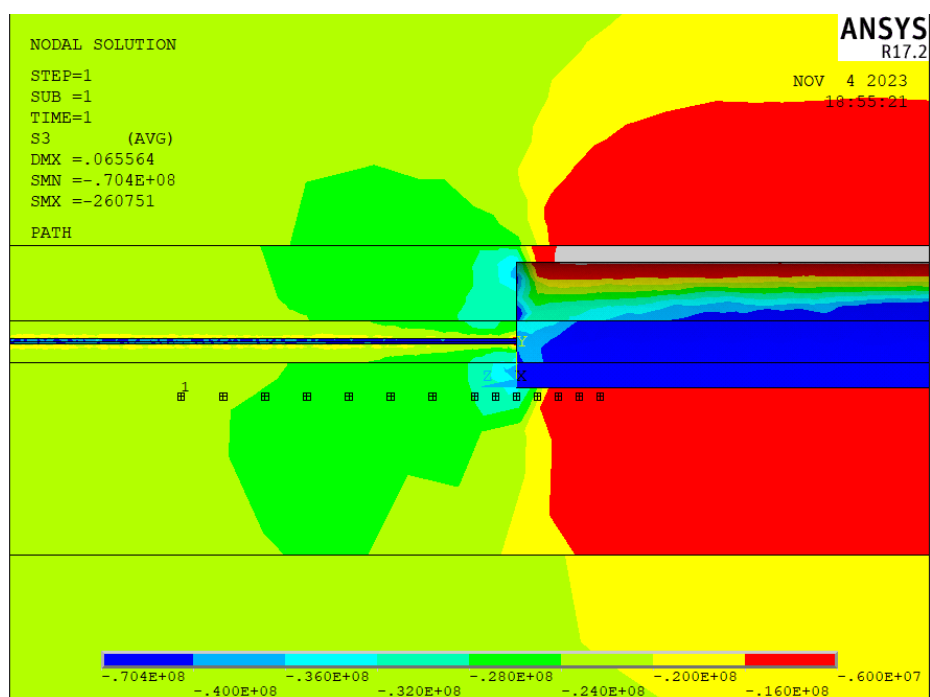


а

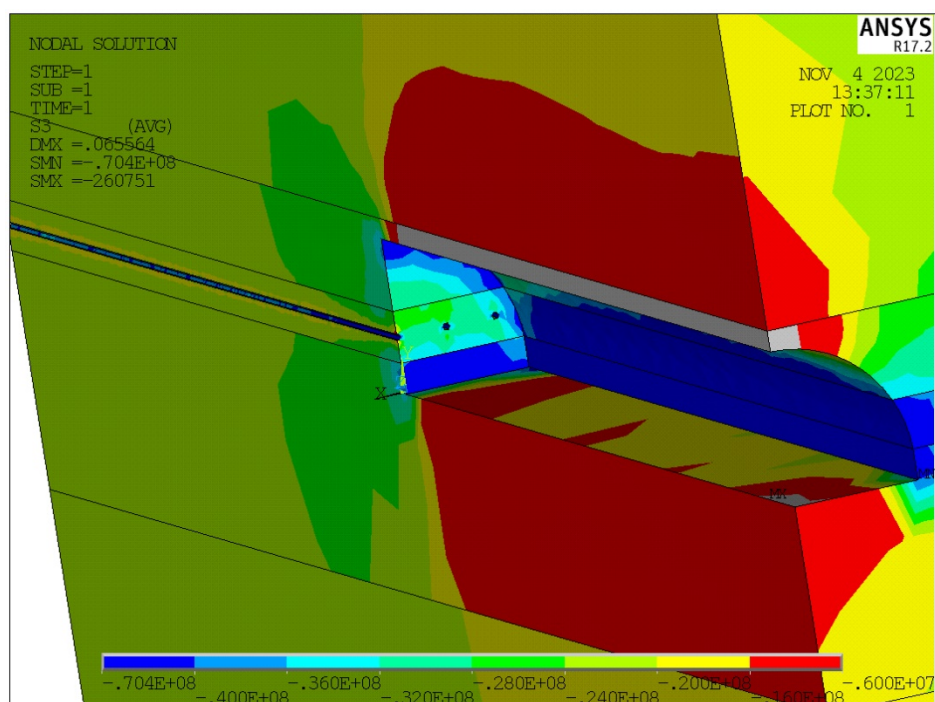


б

Рисунок 4.13 – Модель вирки з розвантажувальними свердловинами, побудована в лініях (а) і об'ємах (б)



а



б

Рисунок 4.14 – Результат розрахунку головних напружень в моделі

Аналіз картин розподілу головних напружень (рис. 4.14) дозволяє дійти висновку, що свердловини, пробурені у вугільному пласті суттєво змінюють розподіл напружень в пласті. Проте ефекти розвантаження майже не

передається на підшву. Для отримання кількісної оцінки впливу розвантажувальних свердловин на розподіл напружень в зоні підвищеного тиску перед вибоєм в підшві пласта проведемо зчитування напружень по профільній лінії проведеній паралельно трасі виробки в підшві на глибині 0,25 м від контуру штреку. Орієнтація профільної лінії показана на рис. 4.14а. Враховано ділянку 8 м перед вибоєм і 2,0 м за вибоєм.

Крива зміни напружень в підшві штрека по профільній лінії наведена на рис. 4.15.

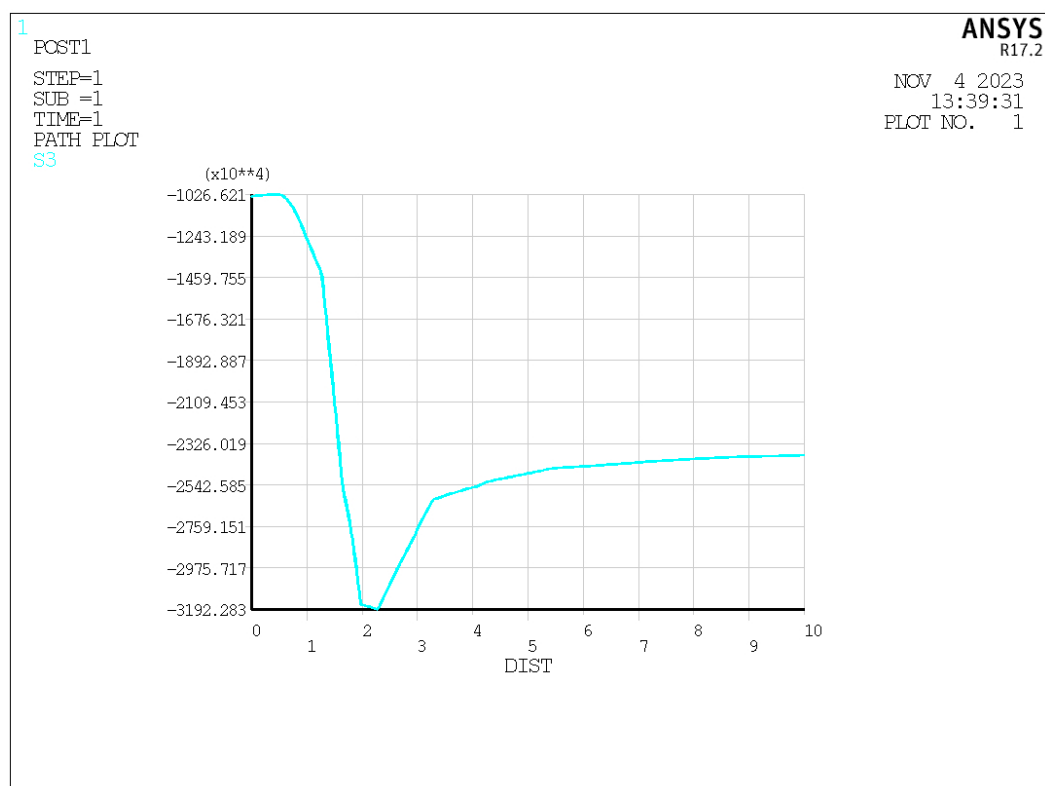


Рисунок 4.15 – Крива зміни напружень в підшві штрека по профільній лінії

Напруження зростають перед вибоєм від 23,8 до 31,92 МПа – під створом штрека. Тобто напруження збільшуються на 25 %. Зона розвантаження починається одразу за створом вибоя штрека. В ній напруження різко знижуються. На відстані 2м за вибоєм в підшві на глибині 0,25м напруження становлять 10,2 МПа, тобто відбувається розгрузка на 57% відносно

початкового поля напружень і на 68% відносно максимальних концентрацій. Таким чином і напруження в зоні підвищених і напруження в зоні понижених напружень становляться менше, але не дуже значно. Враховуючі вартість проведення свердловин і технологічну складність реалізації цього способу в умовах 10 півн. «біс» конвеєрного штрека, який проводиться способом розвантаження не може бути запропонований для подальшого дослідження. Взаємні поміхи бурових і прохідницьких робіт будуть призводити до стримання темпів проведення штреку, що є неприйнятним для умов ПРАТ ш/у Покровське.

4.4 Дослідження способу зниження підняття підосви анкерним кріпленням

Другим способом забезпечення стійкості підосви пропонується анкерне кріплення. Дослідження впливу анкерів доцільно провести в поперечному перетині. При цьому для стримування розшарування підосви і протидії циклічності навантаження анкери доцільно встановити з нахилом в бік вибою. Схема наведена на рис. 4.16.

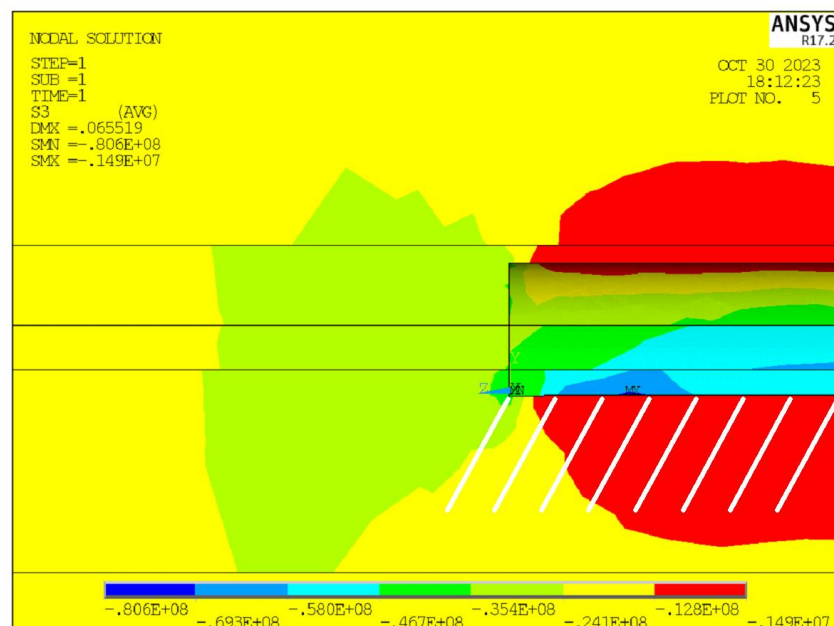


Рисунок 4.16 – Схема запропонованого способу установки анкерів в підосву

Поперечний перетин штреку з анкерним кріпленням підосви наведено на рис. 4.17.

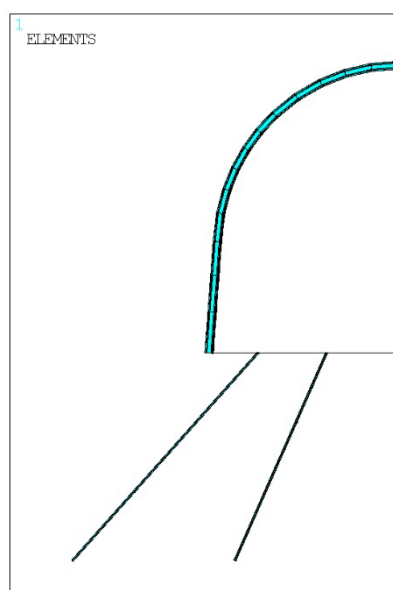


Рисунок 4.17 – Схема кріплення штреку анкерним кріпленням

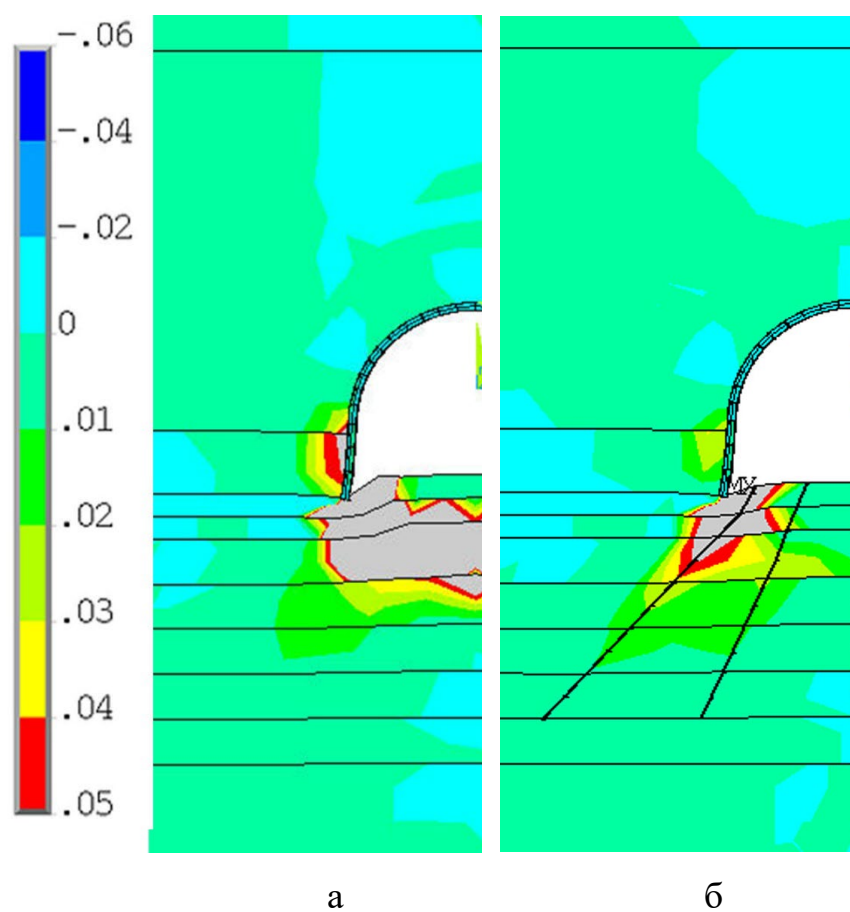


Рисунок 4.18 – Розподіл відносних деформацій в підосві штрека до і після кріплення анкерами

Для аналізу впливу анкерного кріплення на підняття підосви було проведено побудови головних відносних деформацій в моделях без анкерного кріплення і з кріпленням. На рис. 4.18 наведено картини розподілу відносних деформацій в відповідних моделях. Шкала кольорового забарвлення є легендою наведених схем. Критичні деформації для порід підосви штрека становлять 0,025-0,03. Зона позначена на картинах рис. 4.18 сірим кольором символізує зруйновані породи. Критерієм руйнування виступає перевищення розрахункових деформацій критичного пружного ліміту.

Таким чином, аналіз картин розподілу напружень дозволяє дійти висновку, що анкери суттєво зменшують розміри області зони руйнування в підосві штрека (сірі зони в центрі виробки зникають після анкерування). Тільки в кутах штреку формуються критичні напруження, що призводять до руйнування порід. Візуально видно, що анкери позитивно впливають на перерозподіл напружень і деформацій навколо виробки суттєво стабілізуючі їх флуктуацію.

Анкерне кріплення встановлене з нахилом в бік вибою в зону стиснення підосви (рис. 4.16) стримує процес розшарування порід, таким чином ефективність анкерування підосви підвищується.

Для порівняння підняття підосви до і після її анкерування було побудовано графік підняття в абсолютних величинах, що відповідав вертикальному переміщенню (displacement) по контуру підосви штрека. Оскільки модель вісесиметрична і моделюється лише половина перетину, то і підняття підосви наведені лише на напівпрольоті штрека. Однак в силу вісесиметричності можна уявити, що відносно вертикальної осі штрека підняття будуть формуватися симетрично.

Графіки підняття підосви наведені на рис. 4.19. Порівняння дає підстави стверджувати, що після установки анкерів в підосву підняття (пучіння) зменшуються з 0,33 до 0,25м на відстані 8 м від вибою штрека. Тобто відбувається стримання підняття на 32%.

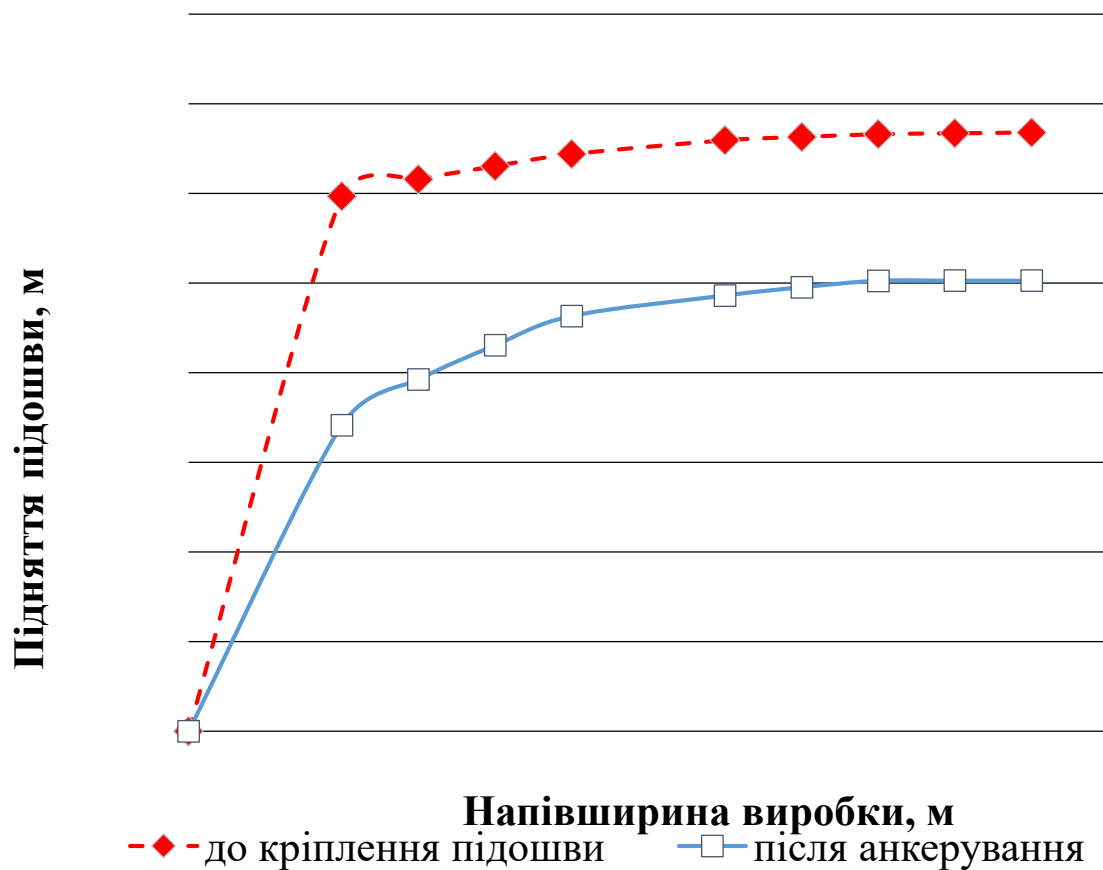


Рисунок 4.19 – Підняття підшви по ширині виробки до і після установки анкерів

Відомо, що розвиток підняття підшви відбувається нелінійно. Іншими словами ефективність встановлених анкерів під час проведення виробки зростає з часом підтримання, оскільки стримані розшарування порід сприяють збереженню стійкості підшви в наступні періоди. Таким чином ефективність анкерування є очевидною. Цей спосіб технічно простіше впровадити, ніж свердловинне розвантаження, тому в якості рекомендованих в магістерській роботі заходів з підтримання виробки доцільно запропонувати саме анкерне кріплення підшви.

Важливо зазначити, що цей спосіб буде працювати тільки в тому випадку, коли анкери будуть встановлені своєчасно. Оскільки після розвантаження порід підшви в них формуються тріщини і розкриваються вже наявні дефекти. До того ж в умовах шаруватого масиву відбувається розкриття

міжшарових контактів, що буде мати вкрай негативні наслідки на стійкість. Це підтверджують результати випробувань зразків, наведені на рис. 4.11, 4.12. Таким чином закріплення таких порід не принесе бажаного ефекту укріплення, і запобігти розвитку процесів підняття підшви навряд чи вдасться. Тому важливо кріпити виробки анкерами нахиленими в бік вибою саме на етапі проведення, тобто безпосередньо у вибої.

5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНКЕРУВАННЯ

5.1 Опис запропонованої системи кріплення штрека блока 10

В магістерській роботі заміна рамного кріплення штрека не передбачається. Лише додатково в підшву пропонується встановлювати анкери. Таким чином кріплення 10 півн. «біс» конвеєрного штрека буде мати такі елементи:

- рамне металеве кріплення КПШУ 20,3 (що зараз використовується в ПРАТ ш/у Покровська, або будь - яке інше, що передбачено паспортом проведення і кріплення штрека);
- сталевополімерні підшвенні анкери закріплені клеєм Лоок Сет.

Поперечний переріз кріплення представлено на рис. 5.1. Подовжній перетин штрека наведений на рис. 5.2.

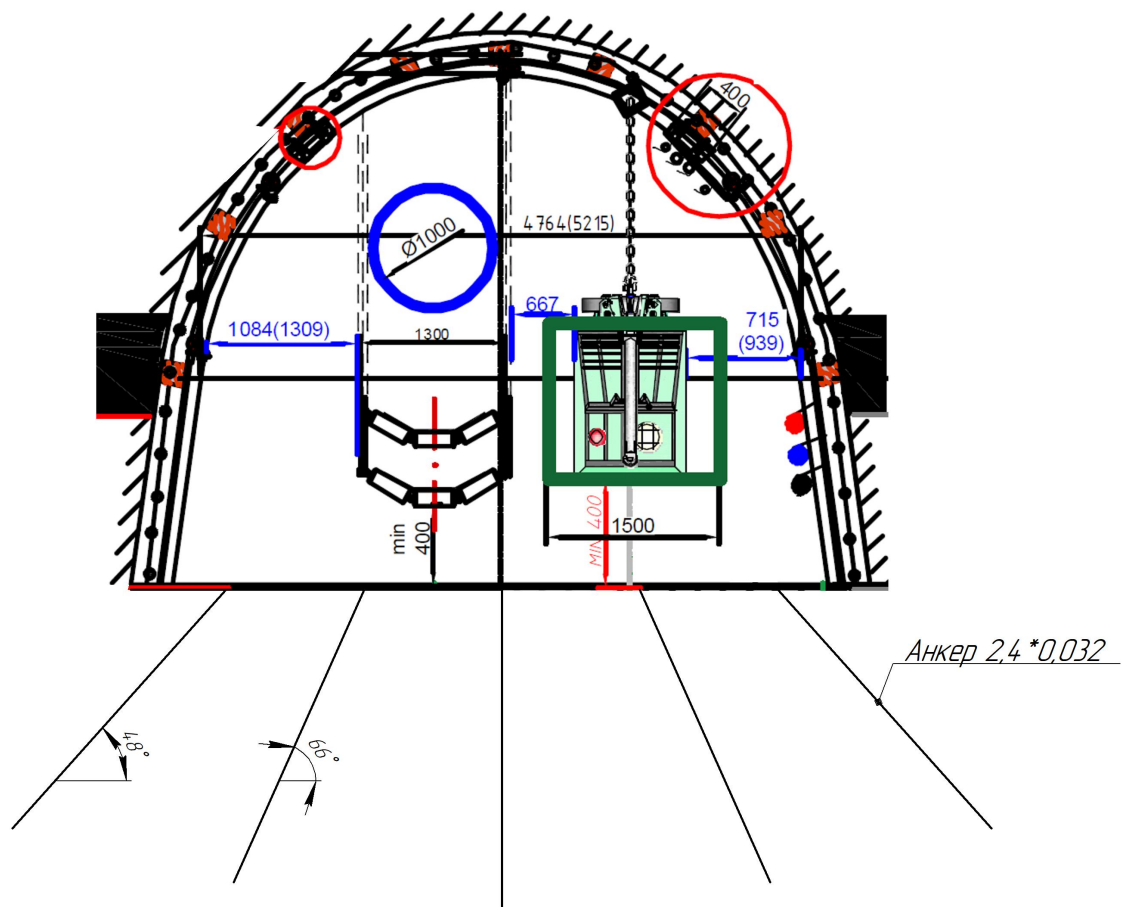


Рисунок 5.1 – Поперечний переріз запропонованого варіанта кріплення штреків блока 10

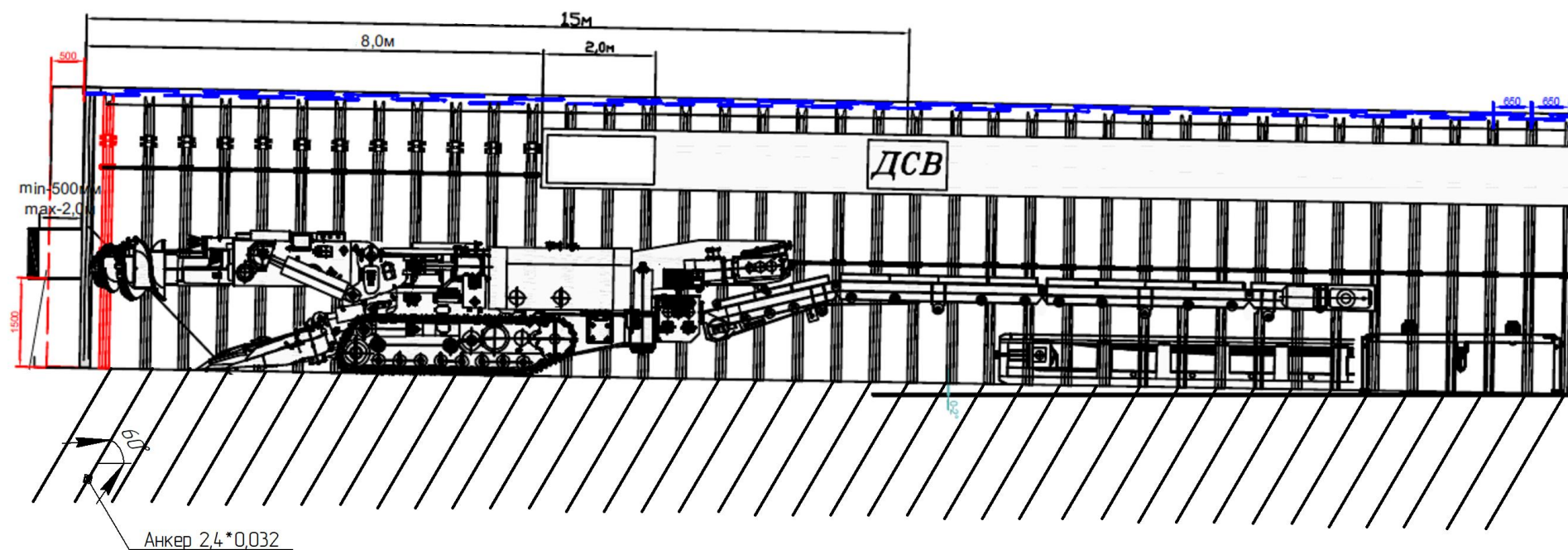


Рисунок 5.2 – Подовжній переріз запропонованого варіанта кріплення 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

5.2 Прогнозування підняття підосви за весь термін існування виробки за стандартною методикою (до і після анкерування)

В попередньому розділі встановлено, що анкерування гарантовано зменшує пучіння на 32%. Очікувані величини підняття підосви без анкетування розрахуємо за стандартною методикою за діючим СОУ10.1.00185790.011:2007 року [26].

Розрахуємо прогнозні зміщення [26]:

$$U_{\Pi} = K_S (U'_{\Pi\Pi} + V'_0 t_0 + K_{KP} U'_1) K' (1 - K_K) \quad (5.1)$$

K_S – коефіцієнт, впливу площі поперечного перерізу штреку у світлі (S , м^2), [26] од.

$$K_S = 0,33 \cdot S^{0,487} \quad (5.2)$$

$U'_{\Pi\Pi}$ – зміщення порід під впливом присічної виробки, мм [26].

$$U'_{np} = 363,65 \cdot \lg\left(\frac{H}{R_c}\right) - 265,4 \quad (5.3)$$

$$U'_{np} = 363,65 \cdot \lg\left(\frac{1150}{34,95}\right) - 265,4 = 286,5 \text{ мм}$$

V'_0 – швидкість зміщень порід в присічній виробці поза зоною впливу лави [26], мм/міс.

$$V'_o = 96,67 \cdot \lg\left(\frac{H}{R_c}\right) - 60,68 \quad (5.4)$$

$$V'_o = 96,67 \cdot \lg\left(\frac{1150}{34,95}\right) - 60,68 = 85 \text{ мм/міс}$$

U'_1 – зміщення порід в присічних виробках в зоні тимчасового опорного тиску лави, мм [26].

$$U'_1 = 10^{(0,5+0,0114 \cdot R) \cdot \lg\left(\frac{H}{R_C}\right) + 1,833 - 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot R_C^2 - 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot R_C} \quad (5.5)$$

$$U'_1 = 10^{(0,5+0,0114 \cdot 34,95) \cdot \lg\left(\frac{1140}{34,95}\right) + 1,833 - 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot 34,95^2 - 1,83 \cdot 10^{-3} \cdot 34,95} = 894 \text{ мм}$$

K' —коефіцієнт, впливу обраної схеми присічки, $K'=0,3$.

K_K —коефіцієнт, долі зміщень порід покрівлі виробки в сумарних зміщеннях, од [26].

$$K_K = 0,64 \cdot \lg\left(\frac{R_{II}}{R_K}\right) + 0,526, \quad (5.6)$$

$$K_K = 0,64 \cdot \lg\left(\frac{40}{32}\right) + 0,526 = 0,588$$

Для устя 10 півн. «біс» конвеєрного штрека:

$$U_{II} = 1,35 \cdot (286 + 84 \cdot 15 + 1 \cdot 894) \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,59) = 945 \text{ мм.}$$

Для кінця 10 півн. «біс» конвеєрного штрека:

$$U_{II} = 1,35 \cdot (286 + 85 \cdot 1 + 1 \cdot 894) \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,59) = 490 \text{ мм.}$$

Для середини 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

$$U_{II} = 1,35 \cdot (286 + 85 \cdot 8 + 1 \cdot 894) \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,59) = 721 \text{ мм.}$$

Після установки анкерів відповідні значення:

для устя 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

$$U_{II} = 945 - 0,32 \cdot 945 = 642 \text{ мм}$$

для кінця 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

$$U_{II} = 490 - 0,32 \cdot 490 = 333 \text{ мм}$$

для середини 10 півн. «біс» конвеєрного штрека

$$U_{II} = 721 - 0,32 \cdot 721 = 490 \text{ мм.}$$

Враховуючі поточні зазори в виробках, передбачені діючим паспортом 10 півн. «біс» конвеєрного штрека додаткові заходи з підтримання виробки не потрібні. Тобто задача, поставлена в магістерській роботі виконана.

5.3 Техніко-економічне порівняння варіантів

В якості порівнювальних варіантів приймається підбивка, як варіант впроваджений на шахті і кріплення підпошки анкерами, як варіант запропонований в магістерській роботі.

Сума витрат:

$$C_{\text{сум}} = C_{\text{пр}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{підсилення}} + C_{\text{ремонт}} \quad (5.7)$$

де $C_{\text{пр}}$ – витрати на проходку і кріплення штреку рамним кріпленням, грн;

$C_{\text{пр}}$ – витрати на охорону штреку, грн;

$C_{\text{підсилення}}$ – витрати на додаткове кріплення, грн.;

$C_{\text{ремонт}}$ – витрати на ремонтні роботи в штреці, грн.

В порівнювальних варіантах витрати на проходку (загальна частина) і на охорону однакові.

Витрати на ремонт (проведення підбивки).

Проведення підбивки одного кубічного метра підпошки машиною ковшового типу (типу EL160) становить 1900 грн. Середня глибина підбивки в шахтному варіанті по довжині виробки становить 0,5 м. Таким чином

$$C_{\text{под}} = L_{\text{діл}} h_{\text{подр}} V_{\text{вир}} c_{\text{под}}, \text{ грн} \quad (5.8)$$

де $L_{\text{діл}}$ – довжина ділянки підбивних робіт, м;

$h_{\text{подр}}$ – висота підбивних робіт м;

$B_{\text{вир}}$ – ширина в штретці, м;

$c_{\text{под}}$ – вартість підбивних робіт одного кубічного метра підосви.

Результати розрахунку по формулі 5.8 представлені в таблиці 5.1.

Сумарні витрати на підбивку підосви становлять 3,365 млн. грн

Таблиця 5.1 – Вартість підбивки порід підосви

Характеристика	Ділянка штрека, м		
	0-250	250-750	750-1500
Підняття підосви, мм	490	605	833
Величина підбивки, мм	0	105	333
Вартість підбивки, грн	0	584535	2780717

Анкерування підосви виробки

Вартість 1 сталевополімерного анкера з закріпленням полімером Лоок Сет установкою $c_{\text{анк}} = 320$ грн. В підосві встановлюється 5 анкерів.

Кількість анкерів по довжині виробки $N = 1250 \cdot 5 / 0,67 = 9328$ штук

Перші 250 м не анкеруємо, оскільки величини підняття не перевищують показників критичних за Правилами безпеки (500мм).

Вартість анкерування

$$C_{\text{анк}} = N \cdot c_{\text{анк}} \quad (5.9)$$

$$C_{\text{анк}} = 9328 \cdot 320 = 2,985 \text{ грн.}$$

Різниця між запропонованим варіантом і шахтним: $3,365 - 2,985 = 380$ тис. грн. Запропонований варіант на 11,3% дешевше. При проведенні порівняння за відсутності вихідних даних з економіки, які є на ПРАТ ш/у Покровське комерційною таємницею було використано спрощену процедуру (не враховані витрати на ремонт виробки по шахтному варіанту). Реальний ефект від встановлення анкерів буде більше, ніж розрахований.

Прийнятна похибка розрахунків в гірництві становить 5-10%. Тому розрахунок навіть з врахуванням похибки є релевантним, що дозволяє зробити висновок про економічну доцільність установки анкерів за запропонованою схемою.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Основні вимоги Правил безпеки в вугільних і сланцевих шахтах до проведення підземних виробок

Поперечні перерізи гірничих виробок повинні відповідати типовим перерізам [28].

Площа поперечного перерізу виробок у просвіті визначається розрахунком за факторами допустимої швидкості повітряного струменя (прівірювання), габаритів поїзда й устаткування з урахуванням мінімально допустимих зазорів, величини усадки кріплення після впливу гірничого тиску [28].

Порожнини, що утворюються за кріпленням, необхідно закладати (забучувати) або заповнювати важкогорючим матеріалом [28].

Возведення постійного кріплення, а також прибирання вугілля і породи після підричних робіт у підготовчих виробках проводяться під захистом тимчасового кріплення [28].

У слабких і нестійких породах (сипких, м'яких, пливунах, схильних до обвалення) виробки проводяться із застосуванням передового кріплення, щитів або іншими спеціальними способами [28].

Працівники, які проводять оббирання покрівлі, мають перебувати під закріпленою ділянкою виробки [28].

Збійка виробок проводиться згідно зі спеціальними заходами, затвердженими головним інженером шахти [28].

Відставання постійно кріплення від вибоїв підготовчих виробок визначається паспортом, але не повинне бути більше ніж 3 м [28].

Технологія перекріплення виробки визначається гірничо-геологічними і гірничотехнічними умовами і регламентується «Технологічним паспортом». Перед початком робіт з перекріплення виробки робочі повинні ознайомитись з паспортом [28].

За якість робіт з перекріплення і дотримання прийнятої технології несе відповідальність старший робочий і керівник робіт у зміні [28].

За безпечне виконання операцій несуть відповідальність особи, які безпосередньо виконують їх. Всі роботи повинні виконуватися по команді старшого робітника [28].

Керівником робіт в зміні є особа технічного нагляду ділянки, якій видана наряд-путівка на виробництво робіт. Керівник робіт зобов'язаний протягом зміни відвідати кожне робоче місце не менше двох разів [28].

Приймання-здавання зміни необхідно проводити на робочому місці. При цьому старший робітник повинен отримати інформацію від попередньої зміни щодо поведінки кріплення і порід, про стан провітрювання, обладнання, що застосовується і інших особливостей, помічених під час перекріплення виробки [28].

Керівник робіт, а при його відсутності старший робітник, на початку зміни повинен заміряти вміст метану і вуглекислого газу в місці роботи і прилеглих виробках на відстані 20 м від нього, а також перевірити наявність засобів індивідуального захисту у робітників [28].

Старший робочий на початку зміни повинен встановити прилад безперервного автоматичного контролю вмісту метану в 3 - 5 м від місця роботи на відстані не більше 0,3 м від покрівлі з боку надходження вихідного струменя повітря. Прилад повинен бути встановлений так, щоб повітряний потік підходив з боку, протилежного лицьовій панелі. При допустимій концентрації метану робочі, по вказівці керівника робіт у зміні, а при його відсутності старшого робітника, повинні привести робоче місце в безпечний стан: перевірити справність загороджень, правильність установки нового кріплення, наявність міжрамних стяжок, дерев'яних розпірок і хомутів, наявність і цілісність затяжок, наявність і правильність установки кріплення підсилення, обібрати навислі шматки вугілля і породи, підтягнути хомути нового кріплення на відстані 10 м від місця перекріплення [28].

Керівник робіт або старший робітник повинен вжити заходів щодо усунення всіх порушень, помічених до початку або під час роботи. При немо-

жливості усунення порушень, які загрожують життю або здоров'ю людей, а також при виникненні в процесі роботи аварійної ситуації, роботи повинні бути негайно припинені за винятком робіт з ліквідації аварії, яка загрожує життю людей і люди виведені в безпечне місце, про що повинно бути повідомлено начальнику ділянки або гірничому диспетчеру [28].

Посилююче кріплення необхідно встановлювати на безпечній відстані від рейкового шляху (транспортних засобів), але не менше 0,25 м від рухомого складу [28].

В якості підсилюючого кріплення необхідно застосовувати дерев'яні стійки діаметром 18 - 20 см, металеві клинові стійки тертя або гідравлічні стійки типу ГСК з насадками [28].

6.2 Заходи безпеки при бурінні шпурів під анкери

При бурінні шпурів під анкери біля місця робіт повинно знаходитися не менше двох осіб [28].

Перед початком робіт з буріння шпурів необхідно визначити ступінь насиченості повітря газом [28].

При бурінні шпурів робітники повинні бути забезпечені респіраторами та захисними окулярами [28].

Під час буріння шпурів повинна бути включена туманоутворююча завіса.

Техніка безпеки при роботі буровими пневмоустановки RAMBOR RTMI 3/1746 1.

Робочий, що виконує роботи на пневмоустановці, повинен знаходитися в захисних окулярах, респіраторі. Прийшовши на зміну, робочий зобов'язаний перевірити справність з'єднання пневмоустановки і пневмопідтримки [28].

Перед виконанням робіт на пневмоустановці необхідно перевірити рівень масла в маслянки, яка знаходиться на пневмопідтримці. До

початку ведення робіт перевірити цілісність з'єднання установки і шланга, що подає стиснене повітря. Місце ведення робіт не повинно бути захищене. При бурінні на місці проведення робіт повинні знаходитися тільки оператор буріння і його помічник [28].

6.3 Вимоги до установки ампул

Об'єм закріплювача в полімерних ампулах повинен забезпечувати щільне заповнення усього вільного простору у шпурі. При відсутності появи незначної кількості закріплювача в усті шпуру після установки штанги, довжину ампули необхідно уточнювати за фактичними замірами [29].

Встановлення ампули із закріплювачем швидкого твердіння у кожний шпур **ОБОВ'ЯЗКОВЕ** [29].

Ампули необхідно встановлювати в шпур за допомогою аплікатора (відрізок тонкостінної пластикової трубки з внутрішнім діаметром - більшим на 2-4 мм діаметру ампули і довжиною 1,5-2 м) та досильника для проштовхування ампул в аплікаторі та шпурі. Довжина аплікатора повинна становити різницю між висотою виробки і висотою робочого з не повністю витягнутою рукою, що дозволяє без використання сторонніх технічних засобів підвести аплікатор до устя шпуру. Довжина дерев'яного або пластикового досильника повинна забезпечити проштовхування полімерних ампул в донну частину шпуру [29].

Ампули необхідно встановлювати в донну частину шпуру. **ЗАБОРОНЕНО** встановлювати ампули з ушкодженою оболонкою, вони повинні бути вкладені в подвійний поліетиленовий пакет, герметично закриті, вивезені на поверхню й утилізовані. Кількість ушкоджених ампул повинно бути заактовано [29].

Встановлення ампул із закріплювачем повинно здійснюватися без найменшого зрушення бурової колонки із точки забурювання [29].

6.4 Вимоги до установки анкерів

Початкове введення анкерної штанги у шпур та її постановка на бурове обладнання повинні виконуватися без найменшого пошкодження оболонок полімерних ампул [29].

Введення анкерних штанг у шпур на повну робочу довжину повинно виконуватися буровою колонкою. Штанги повинні подаватися у шпур у зборі з гайкою, шайбою й індикатором контурним (за необхідністю для конструкцій АКпр). Введення анкерних штанг у шпур повинно здійснюватися без найменшого зрушення бурової колонки із точки забурювання [29].

Штанга повинна подаватися в шпур [29]:

- до дотику із його дном з обертанням;
- частота обертів повинна бути від 200 об/хв до 450 об/хв.;
- швидкість подавання – від 0,15 м/с до 0,25 м/с;
- термін подачі штанги до дна шпуру повинен становити від 40% до 60% терміну твердіння закріплювача.

Закручування гайки повинно [29]:

- виконуватися після набору необхідного рівня міцності закріплювачем, що швидко твердіє [29];
- виконуватися буровою колонкою із шестигранним адаптером [29];
- забезпечувати щільне притиснення підхоплення і затягування до покрівлі виробки [29];
- забезпечувати початковий підпір на приконтурні породи не менше 50 кН [29];
- забезпечувати рівень початкового деформування опорної шайби, достатній для блокування самовільного відкручення [29].

ЗАБОРОНЕНО відкручувати гайки після установки штанги [29].

Термін встановлення анкеру (від початку буріння до завершення загвинчування анкерної гайки) в породи міцністю на одноосьовий стиск [29]:

- а) не більше 40 МПа повинен бути не більш ніж 4 хв.;
- б) від 40 МПа до 60 МПа – не більше ніж 5 хв [29].

ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської роботи вирішено актуальне завдання вибору способу боротьби з підняттям підосви гірничих виробок для умов відпрацювання пл. d₄ ПРАТ «Ш/у Покровське».

Явище підняття підосви особливо гостро стоїть для штреків, що обслуговують очисні вибої. Хоча ще на етапі проведення штреків цей феномен проявляється. В якості об'єкта дослідження в магістерській роботі прийнято конвеєрні штреки блока 10. Для розкриття технологічних обставин підняття підосви було проаналізовано паспорт проведення і кріплення 10 півн. «біс» конвеєрного штрека бл. 10. Це дозволило встановити характерні гірничо-геологічні і гірничотехнічні умови.

Аналіз досліджень різних авторів вказує, що по суті, важливою причиною здимання підосви виробки є те, що проведення виробок на великих глибинах суттєво змінює початковий стан рівноваги в навколишній породі та призводять до різного ступеня перерозподілу напруги. Під дією перерозподіленого напруження навколишня порода підосви виробки зазнає розтріскування, що збільшує пластичну деформацію, поширюючи тріщини всередину масиву. Проведений аналіз літературних джерел дозволив визначити перспективний напрямок дослідження – визначення шляху навантаження пород підосви при проведенні штреків. А також метод дослідження – метод комп'ютерного моделювання.

У роботі в якості основного методу досліджень використовувалося математичне моделювання, яке було реалізовано в програмній системі кінцево-елементного аналізу Ansys.

Аналіз картин розподілу напружень дозволяє дійти висновку, що на відстані 8 м перед вибоєм штреку поле напружень відповідає гравітаційній складовій, ефективні напруження – 23,8 МПа; зона впливу виробки починається на відстані 8,0м перед вибоєм. Наруження зростають в ній від 23,8 до 37,2 МПа – під створом штрека. Тобто напруження збільшуються на 56 %;

зона розвантаження починається одразу за створом вибою штрека. В ній напруження різко знижуються. На відстані 2,0м за вибоєм в підшві на глибині 0,25м напруження становлять 3,8 МПа, тобто відбувається розгрузка на 84% відносно початкового поля напружень і на 90% відносно максимальних концентрацій. Таким чином породи підшви завантажуються циклічно: навантаження-розвантаження. При цьому знак напружень змінюється. Відомо, що циклічне навантаження порід призводить до суттєвого зниження їх межі міцності вже після першого циклу.

Запропоновано два методи боротьби з підняттям підшви – розвантажувальні свердловини і анкерування. Проведено моделювання обох методів.

Встановлено, що після свердловинного розвантаження напруження в зоні підвищених напружень становляться менше. Враховуючі вартість проведення свердловин і технологічну складність реалізації цього способу в умовах 10 півн. «біс» конвеєрного штрека, спосіб розвантаження був відхилений.

Також встановлено, що анкери суттєво зменшують розміри області зони руйнування в підшві штрека. Анкери позитивно впливають на перерозподіл напружень і деформацій навколо виробки суттєво стабілізуючі їх флуктуацію. Розрахунки показали, що анкерування гарантовано зменшує пучіння на 32%. Очікувані величини підняття підшви без анкерування були розраховані за стандартною методикою за діючим СОУ10.1.00185790.011:2007.

Анкерне кріплення встановлене з нахилом в бік вибою в зону стиснення підшви стримує процес розшарування порід, таким чином ефективність анкерування підшви підвищується.

Порівняння варіантів вказує, що запропонований варіант на 11,3% дешевше ніж шахтний. Отримані результати дозволили зробити висновок щодо ефективності запропонованих рішень.

Наведено вимоги охорони праці і заходи з техніки безпеки.

Перелік літератури

1. Проект дальнейшего развития ПАТ «ШУ «Покровське (арх. №177998), Дніпрогіршахт. 2010. 456 с.
2. Du M, Wang X, Zhang Y, Li L, Zhang P (2020) In-situ monitoring and analysis of tunnel floor heave process. *Eng Fail Anal* 109: 104323/
3. Feng JQ, Gong L, Wang LC, Zhou P, Zhang P, Li Y, Liu ZQ (2023) Study on failure mechanism and treatment measures of floor heave of high-speed railway tunnel in the interbedded surrounding rock with high geostress. *Eng Fail Anal* 150: 107365.
4. Xiao TQ, Wang ZY, Liu FY, Dai XL, Zhao S, Yu ZH (2023) Study on the mechanism and technology of 677 floor heave control of deep roadway with strong mining pressure. *J Min Safety Eng* 678 10.13545/j.cnki.jmse.2022.0614
5. Faria Santos C, Bieniawski ZT (1989) Floor design in underground coal mines. *Rock Mech Rock Eng* 22: 249-271.
6. Негрей, С.Г. – Обоснование параметров механического отпора породам почвы выемочных выработок при отработке лав обратным ходом друк. Дисс... канд. техн. наук: 05.15.02.– Донецк, 2007. – 296 с.
7. Литвинский, Г. Г. Механизм пучения пород почвы подготовительных выработок / Г. Г. Литвинский // Уголь – 1987. – No2. – С. 15 –17.
8. Eberhardt E (2001) Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face. *Int J Rock Mech Min Sci* 38: 499-518/
9. Cai M (2008) Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries—Insight from numerical modeling. *Int J Rock Mech Min Sci* 45: 763-772.
10. Du M, Wang X, Zhang Y, Li L, Zhang P (2020) In-situ monitoring and analysis of tunnel floor heave process. *Eng Fail Anal* 109: 104323.
11. Meng QB, Han LJ, Sun JW, Min FQ, Feng W, Zhou X (2015) Experimental study on the bolt–cable combined supporting technology for the extraction roadways in weakly cemented strata. *Int J Min Sci Techno* 25: 113-119.

12. Zhao JP, Tan ZS, Wang XY, Zhou ZL, Li GL (2022) Engineering characteristics of water-bearing weakly cemented sandstone and dewatering technology in tunnel excavation. *Tunn Undergr Sp Tech* 121:685–104316.
13. Sonmez H, Gokceoglu C, Medley EW, Tuncay E, Nefeslioglu HA (2006) Estimating the uniaxial compressive strength of a volcanic bimrock. *Int J Rock Mech Min Sci* 43: 554-561/
14. Wang FY, Feng XT, Zhou YY, Yu XJ (2023) Experimental study on failure evolution mechanism of clastic rock considering cementation and intermediate principal stress. *J Rock Mech Geotech* 15: 1636-1650.
15. Zhang Y, Shao JF, Xu WY, Zhao HB, Wang W (2015) Experimental and numerical investigations on strength and deformation behavior of cataclastic sandstone. *Rock Mech Rock Eng* 48: 1083-1096.
16. Lu J, Yin GZ, Gao H, Li X, Li MH (2020) True triaxial experimental study of disturbed compound dynamic disaster in deep underground coal mine. *Rock Mech Rock Eng* 53: 2347–2364.
17. Feng XT, Xu H, Yang CX, Zhang XY, Gao YH (2020) Influence of loading and unloading stress paths on the deformation and failure features of Jinping marble under true triaxial compression. *Rock Mech Rock Eng* 53:3287-3301.
18. Duan SQ, Jiang Q, Liu GF, Xiong JC, Gao P, Xu DP, Li MY (2021) An insight into the excavation induced stress paths on mechanical response of weak interlayer zone in underground cavern under high geostress. *Rock Mech Rock Eng* 54: 1331-1354.
19. Gu LJ, Feng XT, Kong R, Yang CX, Han Q, Xia YL (2022) Excavation stress path induced fracturing mechanism of hard rock in deep tunnel. *Rock Mech Rock Eng* 56: 1779-1806.
20. Feng XT, Pan PZ, Wang ZF, Zhang YY. Development of cellular automata software for engineering rockmass fracturing processes. In: Barla M, Di Donna A, Sterpi D (eds) *Chall Innov Geomech*. Springer International Publishing, Cham, pp 62–74.

21. 1. Sakhno, I., Sakhno, S., Skyrda, A. & Popova, O. (2022) Numerical Modeling of Controlling a Floor Heave of Coal Mine Roadways with a Method of Reinforcing in Wet Soft Rock. *Geofluids*, 2022, Article ID 3855799, 14 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/3855799>.

22. І.Г. Сахно, С.В. Сахно, А.В. Петренко, О.О. Баркова Вплив затоплення вироблених просторів вугільних шахт на зсуви земної поверхні на прикладі шахти «Котляревська». Наукові праці ДонНТУ: Серія гірничо-геологічна. 2022, 1(27)-2(28), С.26-35.

23. [https://www.ansys.com/products#t=ProductsTab&sort=relevancy&layout=card&numberOfResults=21&f:@promotion=\[Free%20Trial](https://www.ansys.com/products#t=ProductsTab&sort=relevancy&layout=card&numberOfResults=21&f:@promotion=[Free%20Trial)

24. Feng Wang, Haibo Wang, Ying Xu, Bing Cheng, Qianqian Wang, "Analysis of Energy Dissipation Characteristics of Damaged Sandstone under Impact Load", *Shock and Vibration*, vol. 2021, Article ID 4200452, 10 pages, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/4200452>

26. Long-Term Mechanical Behavior of Yucca Mountain Tuff and its Variability Final Technical Report for Task ORD-FY04-021

27. СОУ 10.1.00185790.011:2007 Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. Мінвуглепром України, Київ, 2007.

28. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах

29. СОУ-Н 10.1.05411357.011:2007 Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Правила виконання робіт.