

СОСНА ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЦИФРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ  
ЗДИМАННЯ ПОРІД ПІДОШВИ МАГІСТРАЛЬНИХ ВИРОБОК  
ГЛИБОКИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

184 Гірництво  
магістр

2018

## ЗМІСТ

<b>Реферат</b>	<b>5</b>
<b>Вступ</b>	<b>6</b>
<b>Розділ 1.</b> Здимання порід підшоши в підземних виробках як прояв гірського тиску.	<b>8</b>
<b>1.1.</b> Прояв гірського тиску при підземній розробці родовищ корисних копалин.	<b>8</b>
<b>1.2.</b> Здимання порід підшоши в гірничих виробках: гіпотези та теорії.	<b>11</b>
Висновки	<b>36</b>
<b>Розділ 2.</b> Інструментальні спостереження за деформаціями підшоши виробок у вугільних шахтах.	<b>37</b>
<b>2.1.</b> Методика спостережень та конструкція замірних станцій.	<b>37</b>
<b>2.2.</b> Результати натурних замірів та їх обробка.	<b>38</b>
Висновки	<b>47</b>
<b>Розділ 3.</b> Здимання порід ґрунту в підземних гірничих виробках як втрата пружнопластичної стійкості: числові моделі.	<b>48</b>
<b>3.1.</b> Теоретичне обґрунтування явища здимання порід підшоши в підземних гірничих виробках. Основні керуючі параметри.	<b>48</b>
<b>3.2.</b> Методика моделювання процесу здимання порід підшоши в підземних гірничих виробках.	<b>59</b>
<b>3.3.</b> Приклади чисельних моделей. Керування стійкістю підземних гірничих виробок з підшовою, що здимають.	<b>70</b>
Висновки	<b>89</b>
<b>Висновок</b>	<b>90</b>
<b>Список використаних джерел</b>	<b>91</b>

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота складається зі 102 сторінок, 41 рисунка, 2 таблиць та 107 джерел.

*Ключові слова:* здимання порід підпошви, чисельне моделювання, цифрова імітація, геомеханічний процес, біфуркаційна теорія.

*Об'єкт дослідження:* геомеханічний процес здимання порід підпошви одиночних виробок вугільних шахт.

*Предмет дослідження:* напружено-деформований стан породного масиву, що вміщує одиночну виробку.

*Мета дипломної роботи:* розробка методики моделювання на цифрових моделях явища здимання порід підпошви в одиночних виробках.

*Методи дослідження:* методи біфуркаційної теорії, метод кінцевих елементів.

*Отримані результати та їх новизна:* встановлено закономірності явища здимання порід підпошви в одиночних виробках в умовах ШУ «Степова» ПАТ «Павлоградвугілля».

*Область застосування (практичне значення):* результати дипломної роботи можуть бути застосовані при цифровій імітації процесу здимання порід підпошви в одиночних виробках, та подальшому його вивченні.

## ВСТУП

Актуальність проблеми. Здимання порід підпошви є одним з найбільш поширених геомеханічних процесів в підземних гірничих виробках вугільних шахт. На ліквідації його наслідків зайнято до 30% підземного персоналу. З ним пов'язані великі виробничі витрати. Теоретичне вивчення цього явища ускладнене тим, що в даний час відсутній математичний апарат, що дозволяє описувати процеси, які протікають із надвеликими відносними деформаціями. З цієї причини, не дивлячись на те, що існує велика кількість теоретичних моделей цього явища, рішення проблеми здимання порід підпошви в гірничих виробках ще далеко від завершення.

Найбільш точно описує механізм здимання біфуркаційна теорія, розглядаючи його, як процес втрати пружнопластичної стійкості породного масиву, ослабленого підземною виробкою. Виходячи з цієї теорії і спираючись на можливості чисельного моделювання методом кінцевих елементів, в даній роботі виконані дослідження, пов'язані з цифровою імітацією процесу здимання порід підпошви в одиночних виробках.

Розглянуто гірничо-геологічні умови Виробничого структурного підрозділу (ВСП) «Шахта Степова» ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля».

Мета досліджень полягає в розробці методики моделювання на цифрових моделях явища здимання порід підпошви в одиночних виробках.

Основна ідея роботи полягає в штучному піднятті підпошви виробки і порівнянні розмірів зони непружних деформацій для різних випадків підняття підпошви.

Об'єктом досліджень є геомеханічні процеси, що розвиваються в гірничих виробках глибоких вугільних шахт.

Предметом досліджень є напружено-деформований стан породного масиву, що вміщує одиночну виробку.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені такі основні завдання досліджень:

- огляд інформації в області вивчення проявів гірського тиску, теорій і гіпотез процесу здимання порід підшоши гірничих виробок

- аналіз результатів натурних спостережень за процесом здимання порід підшоши магістральної виробки ШУ «Степова» ПАТ «Павлоградвугілля»;

- імітація процесу здимання підшоши магістральної виробки.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей явища здимання порід підшоши в одиночних виробках шляхом штучного підняття підшоши.

## РОЗДІЛ 1

### ЗДИМАННЯ ПОРІД ПІДОШВИ В ПІДЗЕМНИХ ВИРОБКАХ ЯК ПРОЯВ ГІРНИЧОГО ТИСКУ

1.1. Прояви гірничого тиску при підземній розробці родовищ корисних копалин

Капітальні, підготовчі виробки і, частково, підземні споруди виділяють в окремий клас геомеханічних об'єктів за такими чинниками:

1. Внаслідок особливостей форми - один з розмірів (довжина) у багато разів перевищує два інших розміри (ширину і висоту);
2. Внаслідок особливостей режиму проявів геомеханічних процесів - стаціонарність напружено-деформованого стану масиву навколо цих об'єктів;
3. Внаслідок особливостей експлуатації - досить тривалий період існування, інколи взагалі нескінченний.

Перша особливість дозволяє широко застосовувати плоскі задачі для дослідження напружено-деформованого стану приконтурного масиву, за винятком привибійних та пригирлових ділянок виробок. Друга особливість обумовлює використання статичних задач, а третя - застосування різних (іноді досить коштовних) заходів щодо забезпечення стійкості приконтурного масиву, включаючи кріплення.

Геомеханічні процеси в масивах порід при проведенні капітальних і підготовчих виробок розвиваються по-різному в залежності від гірничо-геологічних умов, тобто від всіх визначальних чинників - властивостей, структурних особливостей і природного напруженого стану масиву порід, а також форм перетинів і розмірів підземних виробок. Виходячи з цього, управління геомеханічними процесами при проведенні виробок здійснюється шляхом вибору

оптимальних форм і розмірів поперечних перерізів виробок, їх оптимальної орієнтації щодо поля природних напруг масиву порід і переважаючих систем структурних неоднорідностей, а також шляхом вибору заходів щодо забезпечення стійкості і, зокрема, необхідних видів кріплень і розрахунку їх параметрів.

Залежно від деформаційних і міцнісних характеристик порід, що безпосередньо прилягають до контуру виробки, можуть мати місце різні види деформацій порід на контурі виробок або їх руйнування. У різноманітних гірничо-геологічних умовах в залежності від властивостей порід процеси деформування і руйнування в стінках, покрівлі та ґрунті виробок мають ті чи інші характерні ознаки і відповідно класифікуються як різні типи проявів гірського тиску.

Відразу ж після утворення чергової ділянки виробки в результаті підривання комплекту шпурів або механічного руйнування внаслідок дії робочих органів машин, породи навколо виробки практично миттєво пружно деформуються. У багатьох випадках процеси деформування вичерпуються пружною деформацією порід, подібний тип проявів гірничого тиску - пружне деформування - характерний для гірничих виробок в умовах високоміцних масивів порід при невисокому ступені їх напруження. Пружне деформування охоплює значну область навколо виробки, в тому числі і навколо раніше пройденої частини цієї ж виробки на деякій відстані позаду вибою.

Внаслідок високої швидкості деформації (наближеної до швидкості звуку для данного породного середовища), пружні деформації навколо вибою встигають розвинути до початку зведення кріплення і в результаті цього часто залишаються непоміченими. Разом з тим, на раніше пройдених ділянках виробки, в разі, якщо вони закріплені вельми жорстким кріпленням, додаткові, навіть незначні, пружні деформації можуть викликати значні руйнування. Щоб уникнути цього жорсткі постійні кріплення завжди зводять з деяким відставанням від вибою.

При цьому важливо підкреслити, що це відставання постійного кріплення необхідно здійснювати не тільки з метою запобігання впливу вибухових робіт на виробку, якщо проходку здійснюють буропідривним способом (дуже поширена думка), але і від зазначеного впливу пружних деформацій.

Фактично, вибір і обґрунтування величини відставання встановлення постійного кріплення від вибою є елементом управління геомеханічними процесами в приконтурному масиві порід.

Пружна деформація порід у виробках іноді може завершуватися інтенсивним крихким руйнуванням порід з виділенням значної кількості енергії. Подібний тип проявів гірничого тиску називається динамічним.

Слід підкреслити, що прояви гірничого тиску в формі крихкого руйнування порід визначаються як діючими напруженнями, так і особливостями деформування порід.

Якщо діючі напруги не перевищують певного критичного значення або ж породи мають здатність до прояву значних пластичних деформацій, то в виробках спостерігається інший тип проявів гірничого тиску - пластичні деформації, як без розриву суцільності (пластична течія), так і з розривом її, тобто руйнування шляхом відриву.

У випадках, коли рівень діючих напруг навколо виробок недостатній для руйнування самих структурних блоків, з яких складний масив, відбувається руйнування порід у формі зсуву і відриву по поверхнях природних тріщин або інших структурних неоднорідностей. Це призводить до найбільш масового типу проявів гірничого тиску - утворення вивалів і заколів.

Якщо ж породи в приконтурній області масиву схильні до прояву в'язких властивостей, зокрема повзучості, то в виробках спостерігаються специфічні типи проявів гірничого тиску - зближення (конвергенція) стінок виробок або ґрунту і покрівлі, або здимання порід. Це характерно для виробок соляних шахт.



Область масиву порід навколо виробок, в якій проявляються пластичні, в'язкі деформації і руйнування, становить так звану зону непружних деформацій. Параметри зони непружних деформацій характеризують стан виробки, вони є вихідними для вибору і розрахунку кріплення, а тому їх визначення - зазвичай кінцева мета теоретичних і експериментальних досліджень.

## 1.2. Здимання порід підосви в гірничих виробках: гіпотези та теорії

Перші згадки про здимання порід в гірничих виробках як про геомеханічне явище відносяться до кінця XIX століття. Короткий огляд робіт цього періоду з проблеми стійкості порід підосви наведено в [1].

Перші вітчизняні роботи, спрямовані на дослідження явища втрати стійкості порід ґрунту при розробці вугільних пластів в Донбасі, з'явилися на початку XX ст. Це роботи практичної спрямованості А.О. Рогалевич [2], В. Лазарева [23], Д.С. Ростовцева та інших авторів [4-11].

Ряд публікацій, присвячених проблемі нестійкого ґрунту гірничих виробок, з'являється в період відновлення шахт і копалень та початку підйому важкої промисловості в Росії і Україні.

Однією з перших робіт, в якій була зроблена спроба наукового підходу до означеної проблеми, була робота проф. Б.І. Бокото [12, 13], в якій без будь-якого наукового пояснення явище здимання зв'язується з впливом тиску склепіння порід покрівлі на м'які породи ґрунту. Фактором, що підсилює здимання, вважається волога. Здимання міцних порід ґрунту даний погляд не пояснює. Теорія М.М. Протод'яконова [14], що припускає утворення в покрівлі виробки розвантажувального параболічного зводу, також не пояснює механізму деформації ґрунту.

У роботі М.І. Євдокимова-Рокотовського [15] надано узагальнення практики будівництва і експлуатації транспортних тунелів в Західній Європі, Малій Азії, Північній і Південній Америці, Японії, Лондонській підземній залізниці. Відносно «випирання» автор зазначає, що найчастіше це характерно для слабких порушених порід, проте «навіть в твердих гірських породах може існувати тиск знизу-вгору».

Здимання, на думку В.І. Белова [16, 17], є розбуханням глинистих сланців, що є пружним розширенням, що відбувається внаслідок усунення поверхневого натягу капілярної води.

Прандтлем [18] несуча здатність порід ґрунту визначається як максимальне навантаження, яке може діяти з боку фундаменту на навколишній ґрунт, не викликаючи руйнувань. У такому вигляді ним була вирішена задача про несучу здатність основи мілкозаглибленого фундаменту

У роботах Г. Шпакелера [19, 20] досліджується механізм явища здимання порід ґрунту, спираючись на практику ведення гірничих робіт у Верхній Сілезії. Їм відзначено, що, починаючи з глибини 500 м, вплив тиску позначається глибоко в ґрунті пласта. Підняття ґрунту має місце як в очисних, так і в підготовчих виробках. Відбувається воно не тільки у вологих, але і в абсолютно сухих породах.

Однією з перших вітчизняних робіт, де виконано всебічне вивчення явища здимання, вважається робота інженера А.В. Гурдус [21].

Автором спочатку висунуті дві робочі гіпотези, згідно з якими здимання є наслідком набухання глинистих порід, що всмоктують вологу, і сил гірського тиску вищерозміщених порід, під впливом яких ґрунт пласта видавлюється у вільний простір виробки. Запропонована автором класифікація інтенсивності процесу видавлювання гірських порід в залежності від міцності покривельної товщі досить умовна, і, тому, згодом неодноразово піддавалася критиці, зокрема, Ю.З. Заславським і В.Т. Глушко [22-24].

Здимання порід ґрунту, з точки зору Д.С. Ростовцева [11, 25], може бути наслідком таких явищ:

- розширення порід, як результат розрядження внутрішньої напруги порід;
- тиск налягачої товщі порід;
- хімічних і фізичних процесів в породах ґрунту, що викликаються атмосферними агентами.

Щодо стану порід при всебічному тиску Д.С. Ростовцевим в [25] наведені міркування К. Терцагі: «З фізичної точки зору, матеріал, що знаходиться в процесі зміни своєї просторово-сітчастої структури, тобто зміни свого петрографічного характеру, викликаного зміною фізичних умов існування, зовсім втрачає здатність опору і приймає проміжний стан, подібний стану рідини з високим коефіцієнтом в'язкості, цілком аморфного тіла. У цьому випадку комплекс пластів, що знаходяться в процесі зміни свого петрографічного складу, ніби постійно перебуває підлеглим лише законам гідромеханіки». На підтвердження цього наводяться результати випробувань Спрінга над кристалічними тілами в умовах високого тиску, підвищеної температури, які сприяють переходу тіл в аморфний стан.

С.С. Давидов [26, 27] вважав, що під впливом вертикального тиску в боках виробки в ґрунті утворюються три зони: активного стану ґрунту, в якій найбільші тиски є вертикальними; пасивного опору ґрунту, в якій найбільші тиску горизонтальні і проміжна, в межах якої є радіальні поверхні ковзання. Точного кількісного вирішення поставленого їм завдання до сих пір немає.

Великий фактичний матеріал спостережень за проведенням гірничих виробок на шахтах Артемівського буровугільного родовища на Далекому Сході в умовах інтенсивного видавлювання порід наведено в роботі А.І. Целігорова [28]. За величиною підняття ґрунту автор розділяє породи на 8 груп і робить припущення, що «ймовірно, вирішальне значення в якості здиманняутворювального фактору тут мають гумусові розчини, що просочують породи в процесі вуглефікації пласта,

зменшуючи їх коефіцієнт внутрішнього тертя і сприяючи пластичній течії навіть при незначному навантаженні». Крім структури і вологи основне значення має гірський тиск, що проявляється в різних ступенях в залежності від геологічних, гідрогеологічних та експлуатаційних факторів, що визначають швидкість і тривалість здимання, а також різну ступінь деформації виробок.

Белозовіч І.М. і Бондаренко О.П. [29] обмежили свої висновки рекомендаціями заходів боротьби з здиманням для певних умов.

Леонов П.В. і Под'ємщиков Н.В. [30] в якості основного фактору, що викликає здимання вважають пластичне деформування порід.

В.М. Городничий [31, 32] підходить до розкриття явища видавлювання гірських порід з позицій теорії пружності. Невідповідність передумов реального характеру деформування порід зумовило непридатність рекомендованих ним розрахункових формул для практики.

Н.М. Покровський зазначає, що до здимання схильні головним чином породи пластичні, вологі [33]. Основною ж причиною здимання автор вважає тиск вищерозташованих порід і зумовлені ним напруги в породах ґрунту з малою механічною міцністю.

Робота М.В. Сироватко носить, в основному, оглядовий характер і стосується аналізу процесів видавлювання в виробках різних глин [34]. У своїх дослідженнях автор значною мірою спирається на роботу Н.Я. Денисова [35] і деякі інші роботи з інженерної геології.

Спираючись на невагомесипуче середовище В.В. Соколовський показав, що тиск з боку ґрунту у виробках є закономірним явищем, та запропонував формулу для визначення величини тиску з боку ґрунту, що залежить від величини тиску в боках, сил зчеплення частинок і кута внутрішнього тертя породи [36]. Застосування на практиці ця залежність не знайшла через складність отримання параметрів, що входять до неї.

Досить детально завдання визначення тиску на кріплення з боку підошви виробки було вперше вирішено П.М. Цимбаревичем [37-39] на основі підходу, запропонованого К. Терцагі.

Подібним же чином В.Д. Слесарєв [40], виходячи з теорії напруженого стану, що виникає в сипучому незв'язаному середовищі, вважав, що в ґрунті виробки діють сили бокового розпору, що викликають в свою чергу бічний розпір другого порядку, який створює тиск з боку ґрунту.

Аналогічна спрощена схема використовувалася і в більш пізніших дослідженнях, наприклад, Єпішева Г.П. [41].

Причина недоліків розглянутої вище групи гіпотез криється, перш за все, в надмірній ідеалізації породного середовища, примітивних розрахункових схемах і в математичному апараті, що застосовується.

М.Н. Шейхет, розглядаючи механізм здимання порід при проведенні виробок, виділяє два основних типи здимання глинистих порід [42]:

- здимання внаслідок їх набухання, що пов'язано зі специфічними особливостями мінералогічного і колоїдно-хімічного складу глинистих порід і проявляється у збільшенні обсягу порід;

- здимання внаслідок гірничого тиску, що проявляється у вигляді течії породи, що видавлюється в виробку.

При проведенні виробки в спучуючих породах, на думку М.Н. Шейхета, навколо неї утворюється зона набухання, розміри якої приймаються рівними розмірам зони непружних деформацій, яка визначається з рішення пружнопластичної задачі К.В. Руппенейта.

Практика показує, що видавлювання порід ґрунту в гірничих виробках є типовим тимчасовим процесом. Таким чином, вивчення процесу здимання порід ґрунту в реологічній постановці більшою мірою відображає його фізичну суть і представляє особливий інтерес з точки зору математичного моделювання явища.

Спроба розгляду механізму здимання як процесу повільно зростаючих деформацій була зроблена в дослідженнях Ф.А. Белаенко, В.Т. Глушко, А.П. Максимова, В.А. Литкіна.

На думку Ф.А. Белаенко і В.Т. Глушко [43], реологічні властивості породи підкоряються законам деформування стандартного лінійного тіла, а здимання як процес є наслідком повзучості. Механізм видавлювання порід представляється як збільшення їх обсягу при зволоженні, внаслідок протікання в породах хімічних реакцій, і видавлювання схильних до пластичних деформацій слабких порід під дією опорного тиску.

Великий комплекс досліджень явища видавлювання гірничих порід в підземних виробках, що включає дослідження фізико-механічних властивостей породного середовища, натурні вимірювання параметрів процесу, а також його фізичне і математичне моделювання, був виконаний А.П. Максимовим [44]. Їм запропоновано розрізняти три стани гірських порід: стійке, граничне і нестійке. Основними класифікаційними ознаками є ступінь стійкості масиву в відслоненнях, опір порід зрушенню, текстурні особливості і ставлення порід до впливу вологи.

На основі реологічної моделі середовища Бінгама-Шведова А.П. Максимовим поставлена і вирішена задача про видавлювання порід в гірничу виробку. Вихідними є рівняння Нав'є-Стокса і рівняння середовища Бінгама-Шведова. В результаті рішення отримано залежності для визначення зсувів в підошві виробки і величини навантаження на кріплення.

Аналітичні результати якісно і, певною мірою, кількісно добре узгоджуються з результатами натурних вимірювань і фізичного моделювання. Зсуви, як випливає з рішення задачі, захоплюють значну область в підошві виробки, зменшуючись у міру заглиблення вглиб масиву, і практично загасають на відстані, рівному, приблизно, 7-8 радіусів виробки.

Недоліком гідродинамічного підходу до вирішення задач геомеханіки є неминуче використання констант, визначення яких стосовно до гірничих порід вкрай важко, наприклад, числа Рейнольдса.

Дещо інше рішення задачі про здимання порід ґрунту у виробках, виконав В.А. Литкін [45], також на основі реологічної моделі Бінгама-Шведова.

Розрахункова схема прийнята автором у вигляді залягачого в ґрунті виробки шару спучуючої породи, затиснутого між значно жорсткішими шарами. У зв'язку з утворенням виробки навколо неї створюється концентрація напружень. Величина їх вертикальної складової на рівні покрівлі спучуючого шару визначається з рішення пружної задачі. Під дією цих напруг в слабкому шарі в околиці виробки утворюються симетрично розташовані області пластичної течії, вертикальні напруги в яких можуть бути визначені з наближеного рішення А.А. Ільюшина [46] про пластичну деформації тонкого шару, затиснутого між плитами.

В результаті рішення задачі визначено обсяг порід, що надходять в виробку в результаті здимання. Розрахунки, виконані за запропонованою автором методикою, дають істотно занижені значення визначених величин.

А.К. Черніков [47] в результаті рішення задачі про поведінку газонасиченого пористого породного масиву, що містить виробка, показав, що сорбційний вплив газу може привести до значних пластичних деформацій на контурі порожнини і, як наслідок, до здимання порід підосви.

А.А. Васильченко [48] пояснює ефект здимання гірничих порід, як наслідок складних фізико-хімічних процесів, що відбуваються в приконтурному масиві через спрямовані міграції води в сторону оголення.

Заславський Ю.З. [23, 24], узагальнюючи результати досліджень багатьох авторів пропонує основними факторами, що визначають процес здимання ґрунту, вважати: напружений стан порід в околиці виробки, обумовлене вагою вищерозміщеної товщі, міцності порід, кут їх падіння, шаруватість масиву,

орієнтування виробки, паралельне або перпендикулярне нашарування, обводненість, її розміри (головним чином - ширина), опір кріплення і термін служби вироблення.

Основним критерієм, що визначає ступінь складності умов розробки, їм було прийнято безрозмірний параметр  $\gamma H/R_{сж}$ . Як критерій здимання - підняття порід при якій процес здимання ґрунту справляє помітний вплив на стан гірничої виробки прийнято значення  $l_0 = 0,2$  м, названа автором «поріг здимання». На основі узагальнення результатів шахтних досліджень, Ю.З. Заславський запропонував залежність, через яку в першому наближенні можна робити прогноз про прояв здимання порід ґрунту. За даними автора, в виробках шириною 3 ... 5 м здимання починає проявлятися при значеннях  $\gamma H/R_{пл} = 0,4 \dots 0,25$ . Ці результати добре узгоджуються зі спостереженнями, отриманими І.Л. Давидовичем і В.Т. Глушко.

В роботі [49] В.Т. Глушко, на підставі рішення задачі по визначенню напруг і переміщень в пружному породному масиві навколо закріпленої одиночної виробки з урахуванням фактора часу, пропонує вираження для визначення глибини, з якої починає відбуватися здимання порід підешви. При цьому автор стверджує, що якщо зона непружних деформацій не виникає або мала за своїми розмірами, то здимання порід не відбувається.

За результатами досліджень робиться висновок, що для умов Донбасу аргіліти і алевроліти, які на глибинах до 400 м можуть бути віднесені до стійких порід, на більш глибоких горизонтах почнуть спучувати і видавлюватися в виробку. Цей висновок переконливо підтвердився досвідом розробки глибоких горизонтів шахт Донбасу.

Порівнюючи властивості здимаючих і неспучуючих порід Донецького басейну, В.Т. Глушко приходять до висновку, що на процес здимання визначальний



вплив надають фізико-механічні властивості гірських порід і сили гірського тиску [50]. Впливу вологи автор відводить другорядну роль.

Вивчаючи властивості і склад гірських порід, В.І. Барановський розділяє їх на дві групи [51, 52]:

- породи, що не мають в складі глинистих компонентів або мають, але в незначній мірі;

- породи, що складаються з глинистих компонентів або містять їх у великій кількості, глинисті і слабкі піщанисті сланці.

Як стверджує автор, породи другої групи за певної величини гірничого тиску можуть видавлюватися в виробку, оскільки володіють пластичними властивостями. При цьому, чим більше гірський тиск, тим інтенсивніше відбувається процес їх вичавлювання. Крім того, ці породи можуть збільшуватися в об'ємі через здатність поглинати вологу.

Експериментальними дослідженнями І.П. Шмикова встановлена пряма залежність інтенсивності здимання порід від величини гірського тиску [53]. Також надана залежність інтенсивності здимання від потужності шару породи, схильної до здимання.

В результаті комплексних досліджень здимання порід Донбасу автори робіт [54, 55] виділили три види деформації порід при здиманні: пластичні; пружні з крихким руйнуванням і набухання порід.

Під пластичними деформаціями маються на увазі деформації порід без розриву суцільності, характерні в основному для глинистих порід. Для Донбасу, вугленосна товща якого складена найчастіше такими породами, як алевроліти, аргіліти і глинисті піщаники, більш характерно крихке їх руйнування, які надходять в виробку у вигляді уламків. Набухання внаслідок зволоження, на думку авторів, відіграє підпорядковану роль.

Сівохін В.І. [56], вивчаючи параметри деформаційних процесів різних порід оточуючих виробку, отриманих за результатами натурних вимірів, приходять до висновку, що в основі механізму здимання не може лежати гіпотеза видавлювання порід з-під штампа, так як механізми процесів в покрівлі та підшві мають однаковий характер, що вказує на однакову їх природу.

А.М. Пяткіна вважає, що величина і характер здимання залежить від фізико-механічних властивостей порід в підшві виробки, їх потужності, величини і тривалості впливу навантаження [57]. При цьому в початковий період після проведення виробки зсувів в ґрунті, схильних до породи на порівняно невелику глибину, незалежно від потужності безпосередньої ґрунту. Однак, у міру зростання напруженості приконтурного масиву, а також при тривалому впливі опорного тиску від очисного вибою, процес руйнування і зсувів захоплює глибші шари порід.

Шахтні дослідження здимання в зоні опорного тиску перед лавою, дозволили М.А. Комісарову [58] і Л.А. Западинській [59] обґрунтувати розрахункову схему деформування ґрунту у вигляді балки або плити з крихкого матеріалу, що лежать на пружній основі та схильні до бічного тиску.

Здимання ґрунту гірничої виробки з позиції теорії пружної основи, завантаженого тиском налягаючої товщі масиву і додатковим навантаженням від впливу виробки, розглядається в роботі [60]. Розрахункова схема максимально ідеалізована, тому отримані рішення є наближеними.

Г.П. Шестаков, вивчаючи здимання порід ґрунту вважає, що здимання може походити від дії стискаючих сил, спрямованих горизонтально, і підпірних сил, спрямованих вертикально, викликаних дією сили від ваги вищерозміщених товщі порід. Характер прояву здимання - пластичне видавлювання, вигин, крихке руйнування - визначається фізико-механічними та структурними особливостями порід ґрунту. Нерівномірність підняття ґрунту по ширині вироблення автор пояснює впливом кута нахилу шарів порід і зазначає, що з боку повстання пласта

здимання має бути значно більшим, ніж з боку падіння [59]. Залежно від величини зсуву порід, він поділяє ґрунти на неспучуючі, помірно спучуючі (до 0,3 м), спучуючі (0,3 ... 0,7 м) та сильно спучуючі (більше 0,7 м).

Черняк І.Л., розглядаючи здимання слабких глинистих порід в шахтних і лабораторних дослідженнях, представив механізм цього явища як видавлювання більш слабких порід ґрунту з-під міцніших порід боків і покрівлі, які грають роль штампів, що лежать на слабкій основі [61]. Для міцних порід, процес їх деформування і руйнування може протікати з формуванням трьох зон деформування: пружно-в'язких деформацій, тривалого руйнування і умовно-миттєвого руйнування. Залежно від рівня діючих напружень і міцності порід, навколо виробки може формуватися одна, дві або всі три зони деформування, з відповідною величиною здимання порід. При цьому стійкість ґрунту і вибір засобів запобігання здимання, залежить також і від поведінки порід покрівлі.

І.Л. Черняк запропонував ймовірно-статистичний метод прогнозу видавлювання порід, що враховує такі фактори: глибину розробки, міцність порід ґрунту, їх потужність і петрографічний тип, а також площу поперечного перерізу виробки. Метод дає можливість не тільки констатувати наявність здимання, але і визначати його інтенсивність.

Розгляд механізму здимання, як явища поздовжньо-поперечного вигину порід, що залягають в ґрунті, під дією більш міцних верхніх, був використаний авторами робіт [62-64]. При цьому автори диференційовано підходять до здимання однорідних і шаруватих порід ґрунту. У першому випадку здимання пояснюється як результат збільшення обсягу порід за рахунок їх розпушення від поздовжнього стиснення. Величина підняття ґрунту в цьому випадку незначна і нею, на думку авторів, можна знехтувати. У другому випадку відбувається розшарування і випинання шарів під дією поздовжнього стиснення. Величина підняття ґрунту велика. Для кількісної оцінки явища авторами отримані графіки, що дозволяють

визначити величину здимання в залежності від потужності безпосередньо ґрунту і міцності порід.

Подібний механізм здимання розглядають також Пірській А.А. і Стовпника С.Н. [64]. У своїй роботі вони вважають основною причиною погіршення стійкості виробок граничний напружений стан масиву, що приводить до руйнування бічних порід. Здимання пояснюється крихким руйнуванням порід в боках виробки на блоки, подальшим втисканням блоків в ґрунт, пошаровому зсуві зі складкоутворенням і витісненням зруйнованих порід в порожнину виробки.

Процеси, які відбуваються в глинистих породах і ґрунтах, розглядаються авторами робіт [65-69] на основі енергетичного підходу з використанням законів колоїдної хімії, фізико-хімії і термодинаміки. На думку авторів, наявність виробки призводить до десорбції газів з води, що міститься в товщі порід, яка супроводжується її скипанням і кавітацією. Це призводить до втрати породою міцності, перетворенню її в аморфну масу і до об'ємного пластичного видавлювання її в виробки.

Вуглевидобувна промисловість Японії порівняно невелика. Істотна глибина розробки (понад 500 м), наявність слабких порід, що вміщують і їх обводненість призводять до того, що основні розкриваючі та підготовчі виробки потребують багаторазового ремонту, необхідність якого викликана, в першу чергу, здиманням порід ґрунту. Значні дослідження цього процесу виконані Д. Хока [70-72]. Їм відзначається, що на ліквідацію наслідків здимання порід ґрунту виїмкових штреків задіяно число робочих, кількість яких більше, ніж робочих зайнятих на виконанні виробничих процесів при безпосередньому видобутку вугілля.

Дослідження Д. Хока засновані на статичних моделях з еквівалентних матеріалів. Встановлено вплив глибини розташування виробок, міцності порід, що вміщують і їх вологості, а також розмірів виробки на величину і інтенсивність здимання ґрунту. Отримано картину переміщень точок приконтурного масиву. Ті

ж дослідження продовжені Д. Хока в роботах [72, 73]. Тут досліджується вплив очисних робіт на параметри процесу здимання, перевіряється можливість зміцнення порід ґрунту анкерними болтами. Детально викладено методіку моделювання.

Аналогічні дослідження процесу здимання для глибини від 400 до 1000 м виконані авторами роботи [74]. Отримано картину переміщень в околиці виробки, встановлено вплив анкерного кріплення на інтенсивність процесу здимання. Авторами зроблений висновок, що збільшення глибини розробки в два рази призводить до збільшення величини підняття ґрунту в 4 рази.

В роботі [75] виконані теоретичні та експериментальні дослідження стійкості горизонтальної виробки з анкерним кріпленням. Аналітичні дослідження виконані методом кінцевих елементів, лабораторні - на фізичній моделі з еквівалентних матеріалів. Встановлено, що застосування анкерів завжди підвищує стійкість виробки, особливо якщо вона пройдена в слабких породах.

У роботах [76, 77] на великомасштабній фізичній моделі з еквівалентних матеріалів також були виконані дослідження впливу анкерного кріплення на процес здимання. Результати моделювання перевірені аналітично методом кінцевих елементів. Пропонується номограма для визначення раціональних параметрів анкерного кріплення порід ґрунту.

А. Зворихта [78] розглянув пружну рівновагу трансверсально-ізотропного масиву в підошві горизонтальної виробки із застосуванням методу функцій комплексного змінного. Отримано залежності, що дозволяють визначити напруги і переміщення в підошві виробки. Конкретних рекомендацій, що впливають з рішення задачі, автор не наводить.

Автори роботи [79], проводячи дослідження на шахтах Хваловіще, приходять до висновку, що набухання глинистих порід в присутності вологи є однією з основних причин виникнення процесу здимання. Як засіб управління напруженим

станом породного масиву рекомендується підривання в підшві виробки невеликих камуфлетних зарядів ВР.

Розвиток способу камуфлетного підривання знайшлося в роботі В. Смолки [80]. У ній докладно в натурних умовах і на математичних моделях методом кінцевих елементів досліджуються можливості цього способу. Встановлено, що таким шляхом можна усунути здимання порід ґрунту, але інтенсивність його знижується приблизно вдвічі. При цьому зона ослаблених порід в боках виробки повинна бути не менше 2,5 ... 4,0 м.

С. Такускім [81] встановлено, що істотними причинами, що викликають видавлювання порід ґрунту, є вплив води і напружений стан масиву в околиці виробки. Вперше вказано на можливість спостерігати за проявами гірничого тиску за допомогою радіаційного методу.

У практичному плані боротьби із здиманням автор випробував різні способи: анкерування ґрунту, камуфлетного підривання, електрична стабілізація глинистих порід. Ефективність цих заходів виявилася вкрай низькою.

У роботах [82, 83] на моделях з еквівалентних матеріалів досліджувався вплив способів охорони виїмкових штреків на стійкість ґрунту. Встановлено, що охорона виробок будовими смугами замість ціликів вугілля знижує інтенсивність процесу здимання.

Глибокі дослідження по встановленню закономірностей процесів здимання і визначенню заходів боротьби з ним були проведені М. Ольденготтом (Німеччина) на моделях з еквівалентних матеріалів [84]. На думку автора, підшва виробки є своєрідними необхідним "клапаном", завдяки якому знімається навантаження з бічних порід і покрівлі. Повне запобігання здимання порід ґрунту призводить до зростання навантаження на кріплення виробки. Особливо яскраво проявляється цей ефект в м'яких породах.

А. Афруз (Іран) на підставі натурних вимірів зсувів боків і покрівлі виїмкових штреків, а також дослідження вологості порід, що вміщують, призводить емпіричні залежності, що дозволяють прогнозувати ступінь деформованості ґрунту штреку попереду лави [85].

В роботі [86] розглядається процес здимання порід ґрунту виробок в Канзас-Сіті (США). Висловлюється припущення, що здимання є наслідком зміни обсягу сульфідів, що містяться в сланцях, при їх окисленні. У якості одного із заходів, що запобігають підняттю ґрунту, пропонується ізоляція глинистих сланців від рудничної атмосфери шаром бітуму або води.

Окрему групу становлять дослідження, які розглядають таке явище, як раптове підняття ґрунту [87-90]. Подібні явища можливі в умовах великих глибин розробки і міцних породах, що вміщують вугілля високого ступеня метаморфізації.

На думку проф. Г.Г. Литвинського [91], спроба пояснити здимання порід ґрунту якоюсь однією причиною, ігноруючи все різноманіття що відбуваються при цьому процесі, можуть виявитися успішними лише для вузького діапазону гірничо-геологічних умов. При цьому розробка, вибір оптимальних параметрів і визначення ефективної області застосування способів і засобів запобігання спученню порід ґрунту повинні базуватися на обліку принципово різних механізмів цього складного прояву гірничого тиску.

Г.Г. Литвинським запропонована гіпотеза, заснована на аналізі механізму втрати стійкості гірничої виробки в процесі розвитку руйнування порід від напруг різних знаків [92, 93]. Для опису процесу руйнування порід прийнятий локальний нормований критерій руйнування  $\omega^*$ . Вторинними класифікаційними ознаками, що дозволяє виділити численні підкласи, є: модель поведінки порід, ділянка руйнування порід на контурі виробки, структурна будова масиву та ін. На основі висунутої гіпотези і накопичених до теперішнього часу теоретичних і

експериментальних даних проф. Г.Г. Литвинським виділені механізми здимання порід ґрунту для різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов.

Розглядаючи умови великих глибин і складних гірничо-геологічних умов, які призводять до утворення навколо виробки зони непружних деформацій, проф. А.Н. Шашенко запропонував біфуркаційну модель здимання, як явище втрати пружнопластичної стійкості породного масиву [94, 95].

В результаті вирішення аналітичної задачі про втрату пружнопластичної стійкості породного масиву в околиці одиночної виробки, розташованої в однорідному масиві, отримано критерій, що оцінює можливість втрати стійкості системи «виробка-породний масив».

Таким чином, здимання ґрунту в умовах великих глибин розробки, що призводять до утворення навколо виробки ЗНД значних розмірів і великими переміщеннями контуру, є переходом системи «виробка-породний масив» в новий стійкий стан, що характеризується аномально великими переміщеннями в локальній зоні приконтурного масиву (змінюючи форму виробки). Механізм такого переходу підтверджений лабораторними дослідженнями, а також чисельними шахтними спостереженнями.

Запропонований критерій дозволяє вже на стадії проектування оцінювати можливість здимання ґрунту в виробці поза зоною впливу очисних робіт і планувати відповідні заходи щодо попередження цього явища або зниження шкідливого впливу.

У дослідженнях природи здимання ґрунту виробок розташованих в умовах великих глибин, проф. А.Н. Роєнко приділив увагу механізму здимання шаруватих порід [96, 97]. Він також використовує критерій, заснований на понятті стійкості рівноважного стану і розглядає здимання шаруватих порід з двох точок зору: як пружно-пластичну втрату несучої здатності породного масиву навколо виробки і як втрату стійкості рівноважного стану породних шарів в ґрунті.



Розглядаючи біфуркаційну модель здимання, запропоновану А.Н. Шашенко, С.Н. Гапеевим досліджені закономірності зміни напружено-деформованого стану структурно-неоднорідного приконтурного масиву в ґрунті одиночної протяжної виробки після втрати пружнопластичної стійкості, тобто на стадії розвитку процесу здимання [99, 100].

Дослідженню закономірностей здимання шаруватих порід ґрунту і встановлення критеріїв їх поздовжньо-поперечної стійкості присвячені роботи Е.В. Фесенко. Їм же запропонована методика прогнозу здимання ґрунту в пластових підготовчих виробках і методика прогнозу втрати поздовжньо-поперечної стійкості шаруватих порід [98, 99].

Наведений вище огляд досліджень процесу здимання вітчизняними вченими не є вичерпним, однак в більшій мірі дозволяє простежити шляхи та напрямки розвитку гіпотез про здимання і оцінити отримані в рішенні цієї актуальної проблеми результати.

З останніх робіт, що стосуються методів прогнозу, можна відзначити роботи [98-105]. Пропонований авторами метод прогнозу ймовірності і величини здимання полягає в статистичній обробці сукупності гірничо-геологічних факторів, що характеризують умови розробки пластів Донбасу, виявленні найбільш значущих чинників і визначенні ступеня їх впливу на ймовірність здимання. У роботах наводяться формули для визначення ймовірності здимання при різних кутах падіння порід і для попередньої оцінки підняття ґрунту в підготовчих пластових виробках. На думку авторів, цей метод може бути з успіхом використаний для оцінки складності ведення робіт при складанні кадастру гірничо-геологічних умов і для розробки закону про гірничу ренту.

Аналізуючи результати виконаних досліджень з питання явища здимання і узагальнюючи розглянуті різними дослідниками гіпотези і моделі здимання порід ґрунту протяжних виробок, можна виділити ряд факторів, прийнятих в якості

основних, що визначають механізм здимання порід і величину зсувів, що дозволяє об'єднати їх в наступні групи [106]:

- 1) набухання глинистих порід від дії вологи;
- 2) розмокання слабких порід від дії вологи;
- 3) видавлювання м'яких порід з-під штампа (під впливом опорного тиску в боках виробки);
- 4) сорбційне набухання газонасичених пористих середовищ;
- 5) поздовжнє стиснення порід ґрунту силами бічного тиску, що виникають від дії вищерозміщеної товщі;
- 6) розвантаження бічних порід від накопичених напружень;
- 7) в'язкопластична течія порід в результаті нерівноважного стану масиву в підшві виробки;
- 8) збільшення обсягу внаслідок розпушення порід в зоні непружних деформацій;
- 9) збільшення обсягу порід ґрунту внаслідок фізико-хімічних процесів, що відбуваються в приконтурному просторі і обумовлених міграцією підземних вод;
- 10) механічна втрата стійкості приконтурного масиву;
- 11) термодинамічні явища в глинистих породах.

Здимання, викликане набуханням, розмоканням або в'язкопластичною течією порід, притаманне породам слабометаморфізованим, що містять велику кількість глинистих частинок і володіють невисокою міцністю. Такі породи характерні для умов шахт Західного Донбасу.

Найбільшою універсальністю в описі природи явища мають, на мій погляд, гіпотези 5, 6 і 8, тобто ті, в основі яких лежить напружено-деформований стан породного масиву і викликані під його впливом механізми здимання. З вищеназваних найбільш загальною є 8-я, яка розглядає явище здимання як механічну втрату стійкості приконтурного масиву.

Слід зазначити, що багато вчених, вивчаючи закономірності здимання і кажучи про головну роль гірничого тиску від вищерозміщеної товщі на його розвиток, розглядають процеси, що відбуваються тільки безпосередньо в ґрунті і, в ряді випадків, в боках виробки, не приділяючи при цьому належної уваги явищам і процесам, що відбуваються в околиці всієї протяжної виробки.

Більш того, складність природи всіх процесів, що відбуваються в породному масиві навколо виробки, вимагає, на мій погляд, розгляду його як єдиної геомеханічної системи «навколишній масив-кріплення-виробка», що, в свою чергу, обумовлює необхідність дослідження явищ, які відбуваються навколо виробки, в їх сукупності і взаємовпливу, без поділу по просторовій ознаці.

Ступінь впливу окремих факторів на здимання порід ґрунту в протяжних виробках крім якісної оцінки про переважну роль того чи іншого із загальної їх сукупності, може бути оцінена за методикою, викладеною в роботах [99, 105]. Методика заснована на результатах статистичної обробки даних, наведених в каталозі шахтопластів Донецького вугільного басейну [107]. У ньому для кожного шару наведені 54 показники, що характеризують 34 гірничо-геологічних фактора і явища, а також дана типізація шахтопластів за основними з них. В результаті відбору найбільш значущих чинників, що впливають на здимання порід і статистичної обробки параметрів, були запропоновані розрахункові формули для визначення ймовірності здимання в конкретних умовах.

Надзвичайна складність проблеми гірничого тиску взагалі і великих деформацій ґрунту, зокрема, не дозволила до теперішнього часу знайти рішень, які були б в достатній мірі ефективними і надійними в забезпеченні експлуатаційного стану виробок.

Сучасні методи і способи боротьби із здиманням порід дуже різноманітні і нерідко суперечливі. В одних випадках одні й ті ж способи ефективні, а в інших - не призводять до очікуваного результату. Такий стан є наслідком неправильного

підходу до різних випадків і форм здимання порід, коли не враховується фізична сутність явища (механізм явища). В окремих випадках не враховують ряд факторів, що не дає кінцевого позитивного ефекту. У більшості ж випадків, прийняті способи боротьби з підняттям ґрунту розраховані на конкретні гірничо-геологічні умови, тобто певне співвідношення головних і другорядних факторів.

Способи боротьби з проявом здимання можна поділити на дві групи:

- способи щодо запобігання здимання або зниження до допустимого мінімуму його шкідливих проявів;
- способи по ліквідації наслідків здимання.

З числа останніх на шахтах зазвичай застосовують: підривання ґрунту без перекріплення виробки; підривання з заміною кріплення; проведення паралельної виробки замість тої, що вийшла з ладу.

Всі існуючі способи боротьби із здиманням порід підшоши виробок за характером впливу поділяються на пасивні і активні.

До перших відносяться: підривання ґрунту і перекріплення, запобігання спученню за рахунок зведення у виробках замкнених конструкцій кріплення. До других відносяться: управління розподілом напружень в породному масиві; зміна міцності порід.

Так як зміщення порід ґрунту в основному мають незатухаючий характер, то за час існування виробки доводиться проводити багаторазові підривання, які вимагають подальшого перекріплення. Підривання ґрунту пов'язане зі збільшенням видачі на поверхню обсягу породи, додаткових витрат матеріалів на ремонт кріплення і рейкового шляху, відволіканням робочих на ремонт і перекріплення виробок, порушенням роботи добувних ділянок і внутрішньошахтного транспорту.

Зниження трудомісткості і вартості робіт підривки ґрунту у виробках здійснюється за рахунок застосування засобів малої механізації, прохідницького обладнання для розбирання і вантаження спучених порід, створення

спеціалізованих машин для підривання ґрунту, впровадження передових методів праці. Для механізації основних операцій при підриванні міцних порід застосовують породонавантажувальні машини, скреперні навантажувачі, а в м'яких глинистих породах - прохідницькі комбайни вибіркової дії.

Досвід використання породовантажних машин і комбайнів для підривання ґрунту показав їх низьку ефективність. Застосування комбайнів економічно мало виправдано через велику енергоозброєність, металоємність і необхідність виконання трудомістких процесів монтажу-демонтажу. Модернізоване обладнання для підривання порід використовується лише в експериментальних обсягах.

У закордонній практиці питання механізації процесів підривання ґрунту в гірничих виробках приділяється велика увага. В якості спеціалізованого обладнання застосовують як модернізоване серійне прохідницьке, так і підшвопідсмикувальні машини з активним ковшем або держакком. При цьому швидкість ведення робіт зростає в 2 ... 5 разів, а вартість витягу 1 м<sup>3</sup> знижується в 2 ... 3 рази.

З метою систематизації схем ведення механізованої підривання ґрунту в одноколійних виробках залежно від наявності і типу додаткового транспортного обладнання, а також способу обробки забою і напрямки посування ремонтних робіт рекомендуються 12 схем [97].

Відносно ефективності цього заходу необхідно відзначити те, підривка ґрунту в кінцевому рахунку призводить до різкої інтенсифікації здимання і зниження стійкості виробки. Як наголошується в [91], періодична підривка ґрунту з метою збереження виробки була виправдана на малих глибинах розробки. В умовах великих глибин така підривка призводить до порушення рівноважного стану порід ґрунту за рахунок зменшення відсічі на фронті руйнування, полегшення доступу води до нижчих пластів, порушення рівноваги порід в боках виробки. Швидкість здимання після підривок зростає в 6-9 разів і більше в порівнянні з

середніми швидкостями, зафіксованими безпосередньо перед підриванням [92]. Часто в процесі підривання частково оголюються стійки аркового кріплення і викликає втрату опори на ґрунт, що рівносильно розкріпленню вироблення, зменшення відсічі кріплення в покрівлі і боках і провокування завалів через можливі динамічні дії при обвалах породи. Практика підтримки виробок в умовах періодичних підривок ґрунту показує, що вже 2-3 підривання, як правило, призводять до необхідності перекріплення виробки.

Зведення замкнутих конструкцій кріплення - другий традиційний спосіб боротьби із здиманням ґрунту виробок. Вплив опору кріплення на зсув ґрунту вивчено недостатньо повно. За даними Г. Янса [84] здимання ґрунту можна знизити на 40% при використанні кріплень з опором 0,2-0,5 МПа. Зважаючи на велику різноманітність гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов проведення та підтримання гірничих виробок, в яких спостерігається значний тиск порід ґрунту, рекомендуються різні конструкції кріплень для попередження здимання [47].

Застосування замкнутих конструкцій кріплень для підтримки виробок в спучуючих породах рекомендувався багатьма дослідниками і, в більшості випадків, це було ефективним заходом [17, 28-32, 94, 95 та ін.].

В окремих випадках дають позитивний результат застосування посилених і комбінованих конструкцій кріплень [17, 21, 86]. Високу ефективність в якості додаткового підсилюючого елемента таких кріплень показав приконтурний шар затампованих порід. На шахтах Західного Донбасу тампонаж закріпного простору став основним способом підвищення стійкості основних підготовчих виробок, в т.ч. і в умовах спучуючих порід ґрунту [54-61].

Установка анкерного кріплення в породи ґрунту з метою боротьби із здиманням ефективно тільки в порівняно сприятливих гірничо-геологічних і гірничотехнічних умовах: при стійких породах невеликої потужності, наявності міцних порід ґрунту, в яких можна надійно закріпити замки анкерів, незначний

вплив очисних робіт на прояв здимання. У більшості випадків застосування анкерного кріплення призводило до зниження швидкості здимання в 1,5 ... 2 рази тільки в початковий період після її установки, внаслідок чого термін первісного підривання ґрунту дещо відсовувався. Надалі закріплені і незакріплені анкерами ділянки порід проявляли себе однаково, причому анкерне кріплення часто заважало роботам по підривці ґрунту. У деяких випадках застосування анкерного кріплення не дало позитивних результатів через наявність в ґрунті виробок потужних нестійких порід, в яких не вдавалося міцно закріпити замок анкера, або через великі швидкості зсуву ґрунту внаслідок значного гірничого тиску і наявності в ґрунті пластичних порід. Результати досвіду застосування анкерного кріплення для попередження здимання порід наведені в роботах [45, 84, 67-70].

Зміцнення глинистих порід камуфлетним вибухом і створення порожнин, що грають роль резервуара для порід, які видаються з-під порід целіків, є однією з різновидів механічного способу зміцнення. Випробування способу зміцнення ґрунту виробок вибухом були проведені на шахтах Підмосковного басейну (на 13 шахтах укріплено 3700 м) і показали позитивні результати [7].

Застосування фізико-хімічних способів для боротьби із здиманням порід поки широкого поширення не отримала. Ряд випадків застосування способу нагнітання в тріщинуваті породи ґрунту цементних розчинів або складів на основі синтетичних смол показали їх високу ефективність. При цементації порід, представлених піщанистими сланцями, здимання припинялося (ш. «Пасков», м Острови-Радваніце). В умовах ш. «Капітальна» ПО «Інтауголь» зміцнення порід синтетичними смолами зменшило зміщення на 42 ... 56% зближення покрівлі і ґрунту, в т.ч. на 60 ... 70% зсувів ґрунту [7].

В якості ефективного заходу боротьби з інтенсивним здиманням в виробках Західного Донбасу автори роботи [39] пропонують зберігати міцність розмокаючих

під дією води глинистих порід шляхом їх пластифікації - фізико-хімічної обробки, яка пригнічує процеси набухання.

Підвищення стійкості виробки і зниження здимання порід ґрунту досягається не тільки зміцненням приконтурних порід, а й за рахунок розвантаження породного масиву від підвищених напруг. Створення області знижених напружень навколо виробки дозволяє перенести опорний тиск в глиб масиву, прискорює утворення в ґрунті виробки зони непружних деформацій і тим самим зменшує період інтенсивних зсувів, що призводить до зниження або припинення пучення порід ґрунту [18]. За даними лабораторних експериментів, ефект від застосування підривнощілевого розвантаження (ПЩР) ґрунту починає знижуватися через 4 місяці, а після 5-6 місяців зникає повністю [20]. За даними експериментів, отриманих в ході дослідження активного попереднього розвантаження (АПР) ґрунту, яку застосовували в деяких шахтах Донбасу, концентрація напружень на контурі виробки знижується в 2 рази, що дає суттєву економію капітальних витрат за рахунок збільшення кроку кріплення [21]. Про високу ефективність цього способу свідчать і дані робіт [42, 44].

Ефективним заходом для боротьби із здиманням порід є створення конструкції зворотного склепіння з розвантажених від напруги і зміцнених порід ґрунту гірничих виробок. Суть методу полягає в перерозподілі напруг навколо виробки за рахунок зміни її форми і використання гірничих порід в якості природного будівельного матеріалу для зведення в підшві виробки конструкції, здатної надати високий опір видавлювання порід у виробку. При цьому в ґрунті виробки за допомогою підривання малих зарядів ВР створюється зона інтенсивної тріщинуватості, чим досягається розвантаження порід від напружень. Після нагнітання в цю зону і захоплення розчину в підшві виробки утворюється монолітна конструкція зі скріплених гірничих порід, здатна витримати значні навантаження з боку масиву [44, 45].



У багатьох випадках підвищення стійкості виробок при спучуючих породах можна забезпечити комплексним застосуванням ряду заходів, що знижують вплив очисних робіт, маючи в своєму розпорядженні виробки в зонах розвантаження під або над виробленим простором лав, застосовуючи охорону виробок будовими смугами та ін. Так, наприклад, Г.П. Шестаков [59], на основі аналізу ступеня впливу різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних факторів на інтенсивність здимання порід у виробках, вказує, що скорочуючи водоприток, довжину лінії очисного вибою при збільшенні швидкості посування лави, а також з огляду на черговість відпрацювання пластів (надробка / підробка), правильно вибираючи способи охорони і перетину капітальних і підготовчих виробок, можна знизити здимання в них.

Аналіз і оцінка способів підвищення стійкості виробок в спучуючих породах показали, що кожен з напрямків має певну область раціонального використання, а ефективність будь-якого способу або заходу залежить від того, наскільки механізм його роботи відповідає реальній природі процесу. З огляду на різноманіття геомеханічних умов застосування і сукупності головних і другорядних чинників, що визначають стійкість і поведінку порід ґрунту, заходи, ефективні в одних випадках, виявляються непридатними в інших. Наприклад, анкерне кріплення, що застосовувалася для кріплення спучуючих порід ефективна в одних виробках, не дає позитивного результату в інших. Монолітні кріплення зі зворотним склепінням застосовувана на шахтах Центрального Донбасу в багатьох випадках полегшували ситуацію із здиманням, а в умовах слабометаморфізованих порід Західного Донбасу виявилось малоефективним без застосування додаткових заходів щодо підвищення міцності приконтурного масиву.

Оцінка стану протяжних виробок в умовах схильних до здимання порід ґрунту, також говорить про те, що ліквідація наслідків здимання неефективна, більш того, призводить до інтенсифікації цього процесу, а застосування різних

способів протидії спученню порід матиме позитивні результати лише в тому випадку, коли механізм їх роботи заснований на фізичній моделі здимання, адекватної реальним умовам експлуатації виробки і реалізація цих способів проведена завчасно.

Незважаючи на великий матеріал з проблеми здимання, на сьогоднішній день завдання дослідження цього явища продовжує залишатися актуальним. Значна кількість гіпотез, що пояснюють природу цього явища, різноманітність методів боротьби із здиманням, призводить до думки про відсутність ясності в розумінні процесів, що лежать в основі настільки поширеного виду проявів гірничого тиску.

## ВИСНОВКИ

- 1) Наведені найбільш поширені типи та види проявів гірничого тиску при підземній розробці корисних копалин;
- 2) Розглянуті і проаналізовані найбільш значущі гіпотези і моделі здимання порід підшоши в одиночних виробках вугільних шахт;
- 3) Надані стислі описи останніх вітчизняних теорій та їх аналіз;
- 4) Проаналізовані сучасні способи боротьби з проявом здимання порід підшоши в підземних виробках.

## РОЗДІЛ 2

### ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ПІДОШВИ ВИРОБОК У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

#### 2.1. Методика спостережень і конструкція вимірювальних станцій

Використання реперів в якості засобів інструментальних досліджень масиву дозволяє вести спостереження за характером переміщень, розшарування і деформування масиву гірських порід навколо виробок, за характером деформування гірських порід і вугілля в зонах опорного тиску і в зонах розвантаження, за проявом гірничого тиску. Для одночасної реєстрації абсолютних і відносних деформацій порід, глибини розшарування породної товщі, виявлення зони зрушення порід і інших параметрів гірничого тиску були використані багатореперні системи в свердловині (рис. 2.1). При використанні реперів з виробки проводилося буріння серії шпурів (свердловин), в кожен з яких встановлювалися комплекти глибинних реперів.

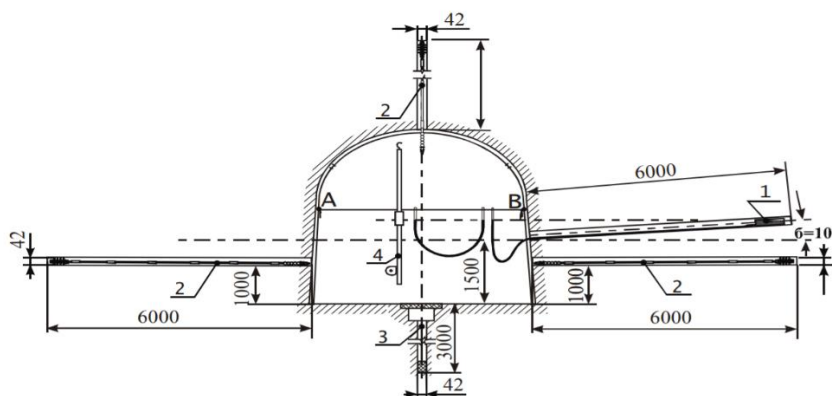


Рис. 2.1. Схема вимірювальної станції. У комплект входило від чотирьох до шести реперів

Вихід від кожного репера в гірничу виробку був жорстким (стрижні, трубки). Відстань між сусідніми реперами вздовж свердловини становила 10 ... 15 діаметрів свердловини. Стрижні від нижніх реперів проходять через всі реperi, що розташовані ближче до гирла шпуру (свердловини). Репери закріплювалися в шпурах (свердловинах) за допомогою клинових розпирних пристроїв. Заклинює пристрої встановлювалися в шпурі на різній глибині, причому репер з найбільш довгим виходом встановлювалися на глибину 6м, де не очікується переміщень. По нижньому реперу (на глибині до 1 м) реєстрували зсуви ґрунту виробки. За допомогою гідрорепера (1) здійснювалося вимірювання переміщень порід ґрунту і покрівлі. Глибинні реperi (2) дозволили визначити переміщення порід в покрівлі і з боків виробки на відстані до 6м. Для визначення переміщень порід з боку подошви використовували глибинний репер (3). Глибинний репер представляв собою дерев'яну пробку, через яку пропускався сталевий дріт. Пробка спеціальними досильними трубами подавалася на задану глибину. Розклинювання репера в свердловині здійснювалося шляхом обтиску реперного пристрою свердловиною протягом певного часу. Реєстрація переміщень глибинних реперів механічного типу здійснювалася на основі періодичних вимірювань у гирла свердловини і з використанням дистанційних вимірювальних засобів.

## 2.2. Результати натурних вимірювань та їх обробка

Спостереження велися протягом 12 місяців. Встановлено, що величина і швидкість зсуву шарів від контуру виробки вглиб масиву має затухаючий характер (рис. 2.2). Спостереження за зсувами реперів показали відсутність істотних зсувів у ґрунті на глибині понад 2 м. У той же час репера, встановлені на глибині 1,0 і 2,0 м, мали зміщення відповідно 190 і 50 мм при зсуві контуру ґрунту на 445 мм. На підставі результатів спостережень за зсувами реперів в приконтурному масиві

східного відкаточного штреку горизонту 418 м після 3 місяців спостережень побудований графік зміни зсувів порід, в залежності від відстані до контуру виробки.

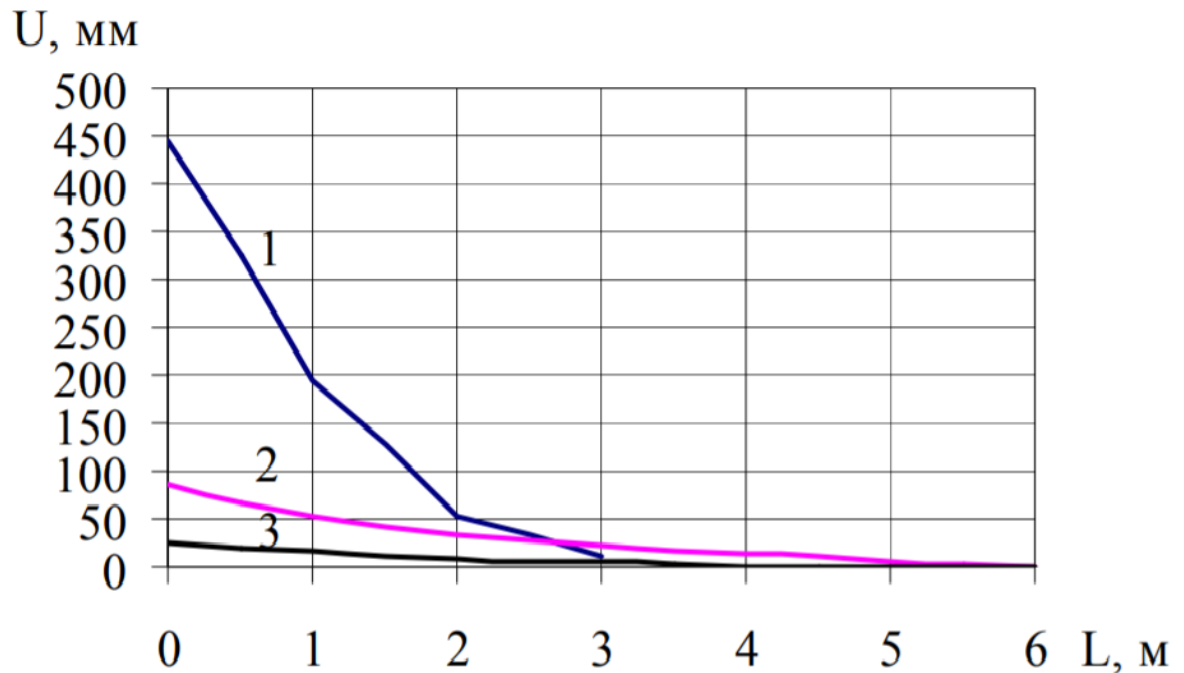


Рис. 2.2. Графік залежності зміщень порід від глибини закладення реперів (1 - зміщення порід ґрунту, 2 - боків виробки, 3 - покрівлі) [23]

Вимірювання зсувів породного контуру проводилися на ділянках виробки, де попередньо були виконані ремонтно-відновлювальні роботи, пов'язані з підриванням порід ґрунту. Це було виконано для встановлення реальних темпів протікання процесу здимання «в чистому вигляді», тобто ніби після процесу проведення виробки. Найбільші зміщення мали місце по осі штреку. Репери, встановлені у боки штреку, мали приблизно однакові переміщення. По зміні відміток на відповідних ділянках вимірювальних станцій визначалася величина

підняття порід підосви і зміна перерізу виробки. Динаміка процесу здимання характеризується значною інтенсивністю процесу в початковий період (40 ... 60 діб), коли реалізуються значні деформації породного масиву в бік виробленого простору. Далі процес носить затухаючий характер, в результаті чого інтенсивність процесу значно знижується, але не стабілізується остаточно. Залежно від гірничо-геологічних умов переміщення покрівлі в околиці виробки відбувається у вигляді розшарування і подальшого пошарового зрушення, ступеневого опускання блоків по перетинають шари тріщинами, а також плавного опускання без видимих розривів суцільності. Загальна довжина експериментальних ділянок склала 170 м, відстань між сусідніми вимірювальними станціями - 10 м. На кожній із станцій, відповідно до методики проведення вимірів в гірничих виробках [46], замірялися величини зсувів порід в покрівлі виробки і кожного з боків, а також - ґрунту. При виконанні шахтних досліджень по визначенню характеру здимання використані роботи А.М. Шашенко [46] і А.М. Роєнко [47], пов'язані з забезпеченням стійкості виробок в умовах здимання порід ґрунту. Даний метод дає можливість не тільки констатувати наявність здимання, а й визначити його інтенсивність (рис. 2.3). Перша серія замірів по всіх станціях була виконана в травні 2002 р. Всього в шахтних умовах було виконано 5 серій вимірів протягом року (з травня 2002 р по лютий 2003 р). Згідно з проведеними вимірами встановлено, що процес здимання носить подібний характер для виробок, що знаходяться на різних горизонтах. Інтенсивність реалізації зсувів порід ґрунту в стадії втрати пружнопластичної стійкості не залежить від глибини.

Після проведення робіт по підриванню ґрунту спостерігався активний розвиток процесів здимання в початковий період (30 ... 50 діб) і затухаючий характер в наступний період.

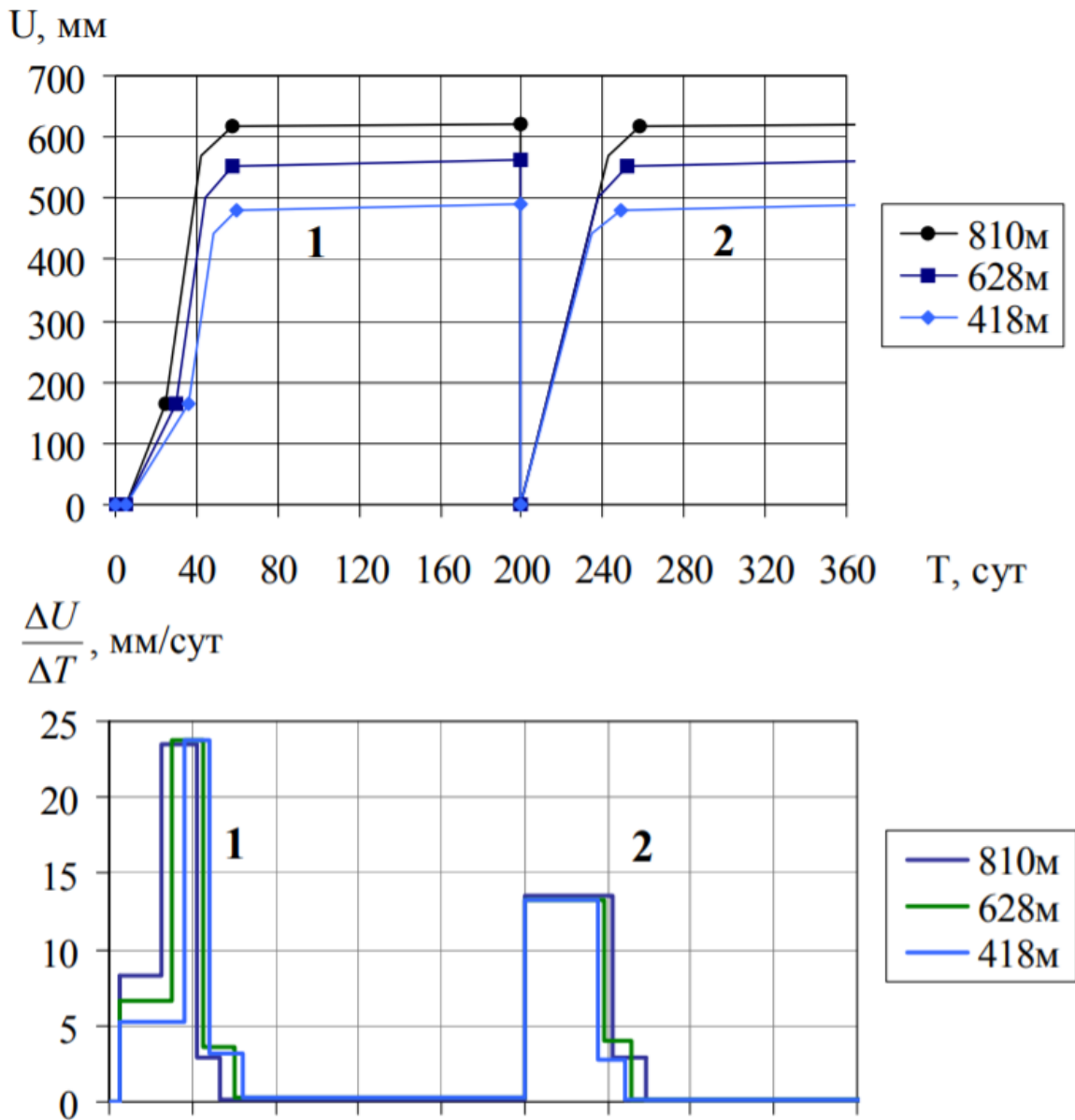


Рис. 2.3. Зміщення (а) і швидкість зсуву (б) порід ґрунту у виробках з замірними станціями на різних горизонтах (1 - до підривання, 2 - після проведення підривання) [23]

Різна інтенсивність протікання процесів здимання в виробках на різних горизонтах у початковий період (25 ... 35 діб) пояснює, чому переміщення порід

грунту проявляються швидше на більш глибоких горизонтах. Встановлено, що середня величина пластичних деформацій на контурі виробки становить 180 мм і не залежить від глибини її розташування, а величина кінцевих пластичних деформацій різна і нелінійно залежить від глибини розташування виробки і тривалості протікання процесу. На підставі рис. 2.3 отримана характерна залежність зміни інтенсивності процесу здимання (після проведення підривання ґрунту) протягом даного періоду експозиції в виробках на різних горизонтах (рис. 2.4).

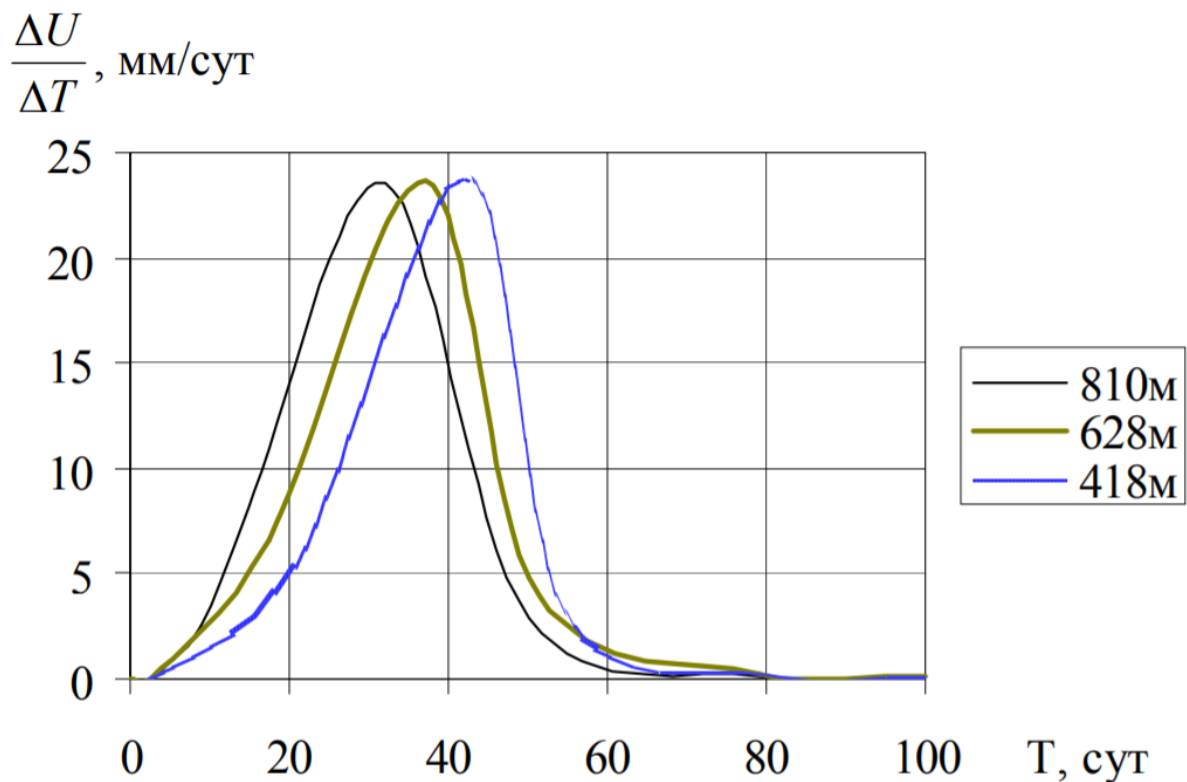


Рис. 2.4. Залежність зміни інтенсивності здимання в часі [23]

Максимальна інтенсивність здимання не залежить від глибини горизонту і дорівнює 24 мм/добу для умов шахти «Степна». Таким чином, для процесу



здимання з використанням програми Curve Expert 1.3 визначена емпірична залежність зміни інтенсивності здимання в часі:

$$U' = (87 - 0,1 \cdot H) \cdot \sqrt{\frac{31}{(1 + e^{7-0,2T})}};$$

$$U'' = (248 + 0,005 \cdot H) \cdot \sqrt{\frac{306}{\left(1 + \frac{3 \cdot 10^5}{e^{0,35T}}\right)}}$$

де  $U'$  і  $U''$  - інтенсивність здимання до і після проведення підривання відповідно, мм/добу;  $H$  - глибина горизонту, м;  $t$  - тривалість експлуатації виробки після проведення підривання, дб.

Однак розмір зсувів порід ґрунту знаходиться в нелінійній залежності від глибини розташування виробок (рис. 2.5). Заміри проводились по ділянках, на яких були проведені роботи по підриванню порід ґрунту на величину до 500 мм. Величина підривання (500 мм) обрана, виходячи з характеру прояви здимання порід у даній виробці.

За результатами, отриманими на основі спостережень за зсувами ґрунту, побудований графік, наведений на рис. 2.6.

Величина підняття ґрунту змінюється нерівномірно, після 3-х місяців з проведення підривання спостерігається максимальне здимання, яке в подальшому має затухаючий в часі характер, і після півроку спостережень досягла 500 ... 520 мм. Після 6 місяців спостережень на експериментальній ділянці було виконане підривання ґрунту (рис. 2.6), в результаті чого спостерігалася циклічність характеру проявів процесів здимання. Розмір зсувів порід ґрунту був ідентичним на відповідних ділянках діаграми, що дозволяє говорити про деякі закономірності процесів, що відбуваються в приконтурному масиві порід до і після проведення підривання.

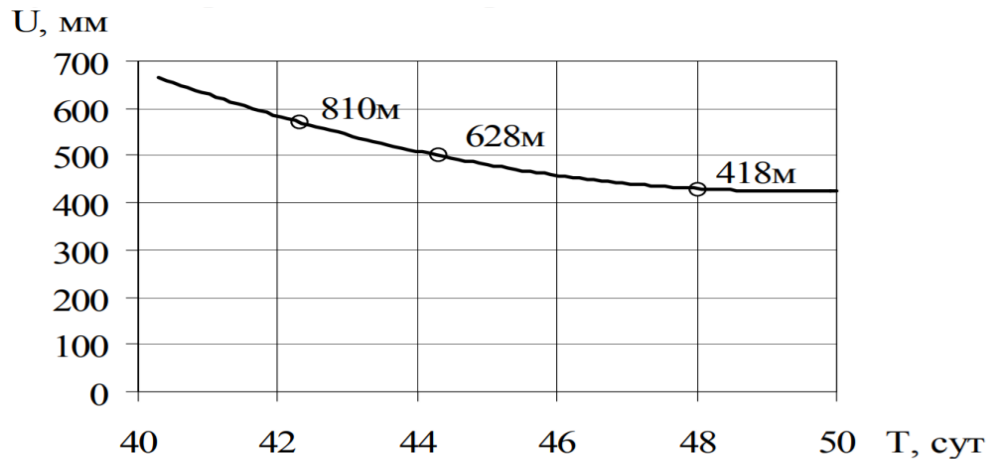


Рис. 2.5. Зміщення порід підшви капітальних виробок на різних горизонтах при максимальному значенні інтенсивності здимання (24 мм / добу) [23]

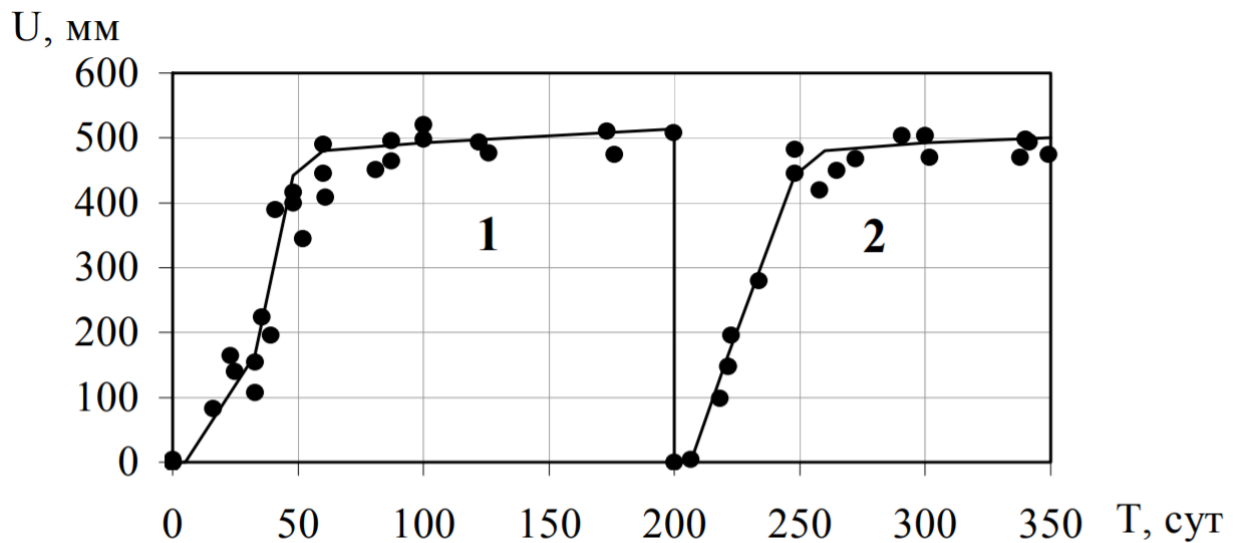


Рис. 2.6. Залежність величини підняття підшви на експериментальних ділянках від терміну експлуатації східного відкаточного штреку гор.418м (1 - до підривання, 2 - після проведення підривання) [23]

Надалі масив експериментальних даних по кожній із станцій оброблявся в лабораторних умовах на ПЕОМ. Ці дослідження дозволили виділити в околиці виробки в міру віддалення від забою наявність декількох областей (рис. 2.7).

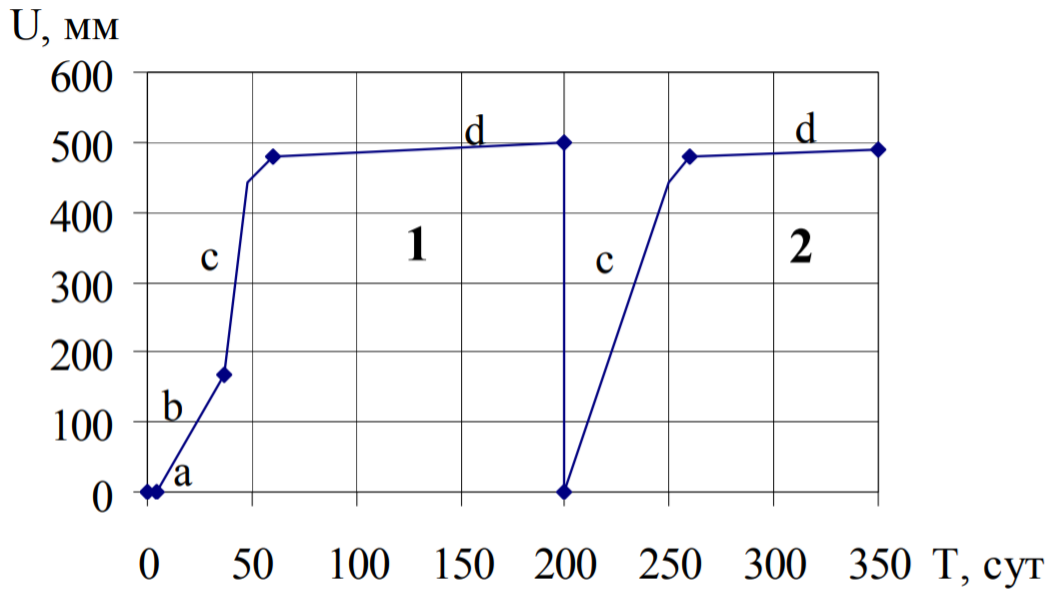


Рис. 2.7. Вертикальна конвергенція порід ґрунту гор. 418м (1 - до підривання, 2 - після проведення підривання) [23]

Дані області характеризуються різною інтенсивністю протікання механічних процесів:

- 1) область пружних деформацій;
- 2) область пластичних деформацій;
- 3) область інтенсивного здимання порід ґрунту;
- 4) область стабілізації або продовження процесу здимання порід ґрунту.

Область здимання порід підосви (3) добре простежується на графіку зсувів - вона характеризується досить швидким перебігом процесу і різким збільшенням зсувів після досягнення ними певного критичної межі в попередній області (див.

рис. 2.3, 2.7). Область (4) завершує процес активного деформування приконтурного породного масиву. Інтенсивність деформацій різко падає, вони або стабілізуються, або не стабілізуються в часі. Аналіз літературних джерел з подібними натурними дослідженнями показує, що всі вони, з поправкою на конкретну гірничо геологічну ситуацію, якісно досить близько відображають картину розвитку здимання порід ґрунту. Ця обставина вже сама по собі говорить про те, що в основі даного явища лежить деяка загальна фізична закономірність. Початок здимання порід ґрунту виробок завжди пов'язаний з утворенням області (3). Характерною її особливістю є дуже швидке зростання деформацій протягом досить короткого проміжку часу (зона 1), що відбувається після того, як пластичні деформації досягають деяких граничних (критичних) значень. Після проведення підривання ґрунту (зона 2), зазначено, що область (3) характеризується меншою інтенсивністю процесу при більшій тривалості, що є результатом втрати пружнопластичної стійкості породами ґрунту і переходом в новий рівноважний стан. Таким чином, в гірничо-геологічних умовах шахти «Степова» здимання порід ґрунту в капітальних виробках носить циклічний характер і являє собою загасаючий в часі, в межах циклу, процес втрати пружнопластичної стійкості приконтурного масиву, що характеризується наявністю чотирьох стадій - пружною, пружнопластичною, втратою пружнопластичної стійкості і загасання інтенсивності деформацій - в першому циклі і двох стадій - втрати пружнопластичної стійкості і загасання інтенсивності деформацій в наступних циклах, що дозволяє на цій основі розробляти технічні рішення по управлінню його параметрами. Здимання порід найбільш інтенсивно протікає в початковий період експлуатації виробки, після виконання робіт по проведенню або перекріпленню виробки з проведенням підривання порід ґрунту. Протягом перших 2-х місяців інтенсивність здимання досягає 24 мм / добу незалежно від глибини залягання горизонту, знижуючись до 0,75 ... 1 мм / добу після 6 місяців. Середня величина пластичних деформацій на контурі виробки

становить 180 мм і не залежить від глибини її розташування, а величина кінцевих пластичних деформацій різна і нелінійно залежить від глибини розташування виробки і тривалості протікання процесу, що дозволяє прогнозувати періодичність ремонтних робіт і оцінювати ефективність застосовуваних технічних рішень. Результати досліджень процесів здимання до і після проведення підривання показали ідентичний характер розвитку геомеханічних процесів при періодичності підривання ґрунту кожні 3 ... 4 місяці. Отримані результати мають хорошу збіжність з результатами робіт Шашенко О.М., Роєнко А.М., Сдвижкова Е.А., Тулуба С.Б., Татарінова А.А. [47, 67, 72, 75], заснованих на теорії втрати пружнопластичної стійкості (наукова школа проф. О.М. Шашенко). Аналіз натурних досліджень показує, що всі вони, з поправкою на конкретну гірничо-геологічну ситуацію, якісно досить близько відображають картину розвитку здимання порід ґрунту. Ця обставина говорить про те, що в основі явища лежить деяка загальна фізична закономірність.

## ВИСНОВКИ

- 1) Надано та описано конструкцію вимірювальних станцій і приведена методика спостережень за ними;
- 2) Проаналізовано та оброблено результати натурних вимірювань;
- 3) Доведено, що процес здимання порід підпошки є процесом втрати пружно-пластичної стійкості породного масиву послабленого капітальною виробкою.

## РОЗДІЛ 3

### ЗДИМАННЯ ПОРІД ПІДОШВИ В ПІДЗЕМНИХ ВИРОБКАХ ЯК ВТРАТА ПРУЖНОПЛАСТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ: ЧИСЕЛЬНІ МОДЕЛІ

3.1. Теоретичне обґрунтування явища здимання порід підшоши в підземних гірничих виробках. Основні керуючі параметри.

В основі фізичної моделі процесу здимання лежить явище втрати стійкості рівноваги - переходу механічної системи з одного рівноважного енергетичного стану в інший, більш низького рівня, що характеризується наявністю великих переміщень на контурі виробки. Існують різні методи дослідження стійкості просторових деформованих тіл, досить повний аналіз їх можна знайти в роботах А.Н. Гузя [11-13]. Стосовно до гірничих виробок співвідношення просторової теорії стійкості вперше використали Л.В. Ерошова [14], потім Л.Н. Насонов [15], М.Т. Алімжанова [16] та інші на основі спрощеного підходу, розробленого А.Ю. Ішлінським [17] і Л.С. Лейбензоном [18]. Особливість його полягає в тому, що параметр навантаження вводиться тільки в граничні умови, які враховують зміни форми границі при спученні.

У роботах А.Н. Гузя [11-13] отримала розвиток інша, просторова, теорія стійкості, заснована на лінеаризації всіх вихідних рівнянь. Параметр навантаження, що визначає критичні умови, входить в ці рівняння, і рішення задачі, навіть в тому випадку, якщо вихідний незбуджено - напружений стан є однорідним, нашттовхується на значні математичні труднощі, які унеможливають отримання замкнених рішень задач механіки гірських порід.

Підхід до вирішення задач стійкості тривимірних тіл, що деформуються, запропонований А.Ю. Ішлінським і Л.С. Лейбензоном, не впливає з основних співвідношень лінійоризованої теорії стійкості, однак розкладання в

асимптотичний ряд таких рішень показує, що перший член розкладу для критичної сили збігається зі значенням критичної сили, отриманої на основі підходу Кирхгофа-Лява. Таким чином, спрощений підхід А.Ю. Ішлінського-Л.С. Лейбензона цілком можна застосувати при дослідженні стійкості рівноваги породного масиву в околиці одиночної гірничої виробки, що знаходиться в стані пластичного деформування.

В.Д. Ключников, розглядаючи біфуркаційні ситуації для просторових систем, зазначив, що питання стійкості не мають практичного значення для пружних тіл, оскільки втрата стійкості в них відбувається лише при напруженнях, порівнянних з величиною модуля Юнга [19]. Таким чином, пружна модель не може лежати в основі дослідження стійкості породного масиву, оскільки він зруйнується раніше, ніж відбудеться пружна біфуркація.

В останні роки активно розвивається нова прикладна математична дисципліна, предметом досліджень якої є біфуркаційні явища різної природи. За кордоном ці дослідження отримали загальну назву теорії катастроф [21 та ін.], у нас - теорії гладких відображень, що розвивається в основному роботами В.І. Арнольда [21 та ін.], і його школи. Нова математична теорія народилася на стику двох дисциплін - топології і математичного аналізу. Її основу складають теорії особливостей гладких відображень Х. Уїтні і теорія стійкості і біфуркації динамічних систем А. Пуанкаре, А. Ляпунова та А. Андронова, істотно розвинені і об'єднані в роботах Р. Тома.

Теорія катастроф дозволяє якісно оцінити тенденцію поведінки складних динамічних систем в разі декількох керуючих параметрів стану. Прикладом однієї з таких систем є породний масив, що містить виробку.

Дослідження на основі нового біфуркаційного підходу дозволять в майбутньому, ймовірно, побудувати в першому наближенні якісну теорію гірничого тиску, яка на загальній енергетичній основі зможе розкрити і пояснити ті

фізичні явища, які проявляються в гірничих виробках у вигляді раптових викидів породи і вугілля, стріляння, гірничих ударів, здимання і того, що, можливо, ще очікує гірників на великих глибинах.

Перехід навколоконтурного породного масиву з одного енергетичного стану в інший, що супроводжується пластичним перебігом середовища, сформулюємо як задачу про втрату стійкості рівноваги в постановці А.Ю. Ішлінського-Л. С. Лейбензона.

Рішення задачі в аналогічній постановці для неділатуючого середовища із залученням умови пластичності Тріска-Сен-Венана виконано в роботах [289; 290]. В основу даної задачі покладено умову міцності (3.5), яку, відповідно до підходу А. Ю. Ішлінського - Л.С. Лейбензона, необхідно лініаризувати. У зв'язку з цим припущено, що породний масив в пластичній області втрачає міцність і розпушується однорідно, набуваючи в результаті деяку середню залишкову міцність  $\bar{R}_c$  і відповідну їй середню величину відносного збільшення обсягу  $\bar{\varepsilon}_v$ , які забезпечують ті ж розміри області непружних деформацій  $R_L$  і переміщення контуру виробки  $U_0$ , що і в випадку реального неоднорідного деформування. Діаграма деформування гіпотетичного породного середовища з однорідною ділатанцією показана на рис. 3.1.

Формули для визначення компонентів незбудженого напружено-деформованого стану в пружній і пластичній областях, вважаючи, що до проведення виробки породний масив знаходився в стані гідростатичного тиску.

$$\sigma'_r = \bar{R}_c \ln r + P_0; \quad (3.1)$$

$$\sigma'_\theta = \bar{R}_c (\ln r + 1) + P_0; \quad (3.2)$$

$$\tau'_\theta = 0. \quad (3.3)$$



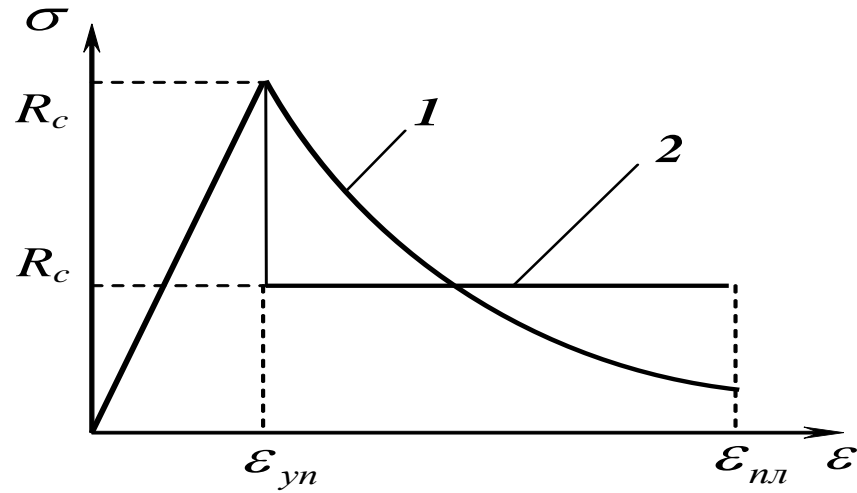


Рис. 3.1. Лінійаризована діаграма деформування породного середовища з ділатанцією: 1 - пластично неоднорідне середовище; 2 - пластично однорідне середовище [68]

Рішення неоднорідного диференційного рівняння з урахуванням того, що при  $r = r_L, U'_{[r]} = U'_r$ , має вигляд

$$U'_r = \frac{1-\bar{\varepsilon}_v}{2} r + \left( \frac{\bar{R}_c}{4G} - \frac{1-\bar{\varepsilon}_v}{2} \right) \frac{r_L^2}{r}; \quad (3.4)$$

$$U'_\theta = 0. \quad (3.5)$$

Відносні деформації в пластичній області дорівнюють

$$\varepsilon'_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{dU'_r}{dr} = \frac{1}{2r} \bar{\varepsilon}_v - \left( \frac{\bar{R}_c}{4G} - \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_v \right) \frac{r_L^2}{r^3}; \quad (3.6)$$

$$\varepsilon'_\theta = \frac{d^2U}{dr^2} = \left( \frac{\bar{R}_c}{2G} - \bar{\varepsilon}_v \right) \frac{r^2}{r^3}. \quad (3.7)$$

Знайдемо радіус області пластичних деформацій:

$$r_L = \exp\left(\frac{\gamma H - P_0}{\bar{R}_c} - \frac{1}{2}\right). \quad (3.8)$$

Середні значення залишкової міцності  $\bar{R}_c$  і відносного збільшення обсягу  $\bar{\varepsilon}_v$  можна визначити, порівнюючи залежності (3.2) і (3.6) з аналогічними співвідношеннями, отриманими на основі нелінійної умови міцності.

В результаті отримаємо такі формули:

$$\bar{\varepsilon}_v = 2\varepsilon_v^* \left[ 1 - \frac{2r_L^2 \ln r_L}{(r_L^2 - 1)^2} \right]; \quad (3.9)$$

$$\frac{\bar{R}_c k_c}{\gamma H} = \frac{B}{\sqrt{\frac{\gamma H}{2\bar{R}_c k_c} - \frac{1}{2} [1 - B + A(r_L^{-2} - 1)]}}, \quad (3.10)$$

де  $\varepsilon_v^*$  - величина максимального відносного об'ємного розпушення на контурі виробки.

Залежності, відповідні формулами (3.9) і (3.10), показані на рис. 3.2 і 3.3.

Таким чином, основний напружено-деформований стан визначено.

У загальному випадку при втраті стійкості рівняння спотвореного контуру виробки можна представити в наступному вигляді:

$$r = 1 + \alpha \cos \theta, \quad (3.11)$$

де  $\alpha$  – константа;  $\theta$  – полярний кут.

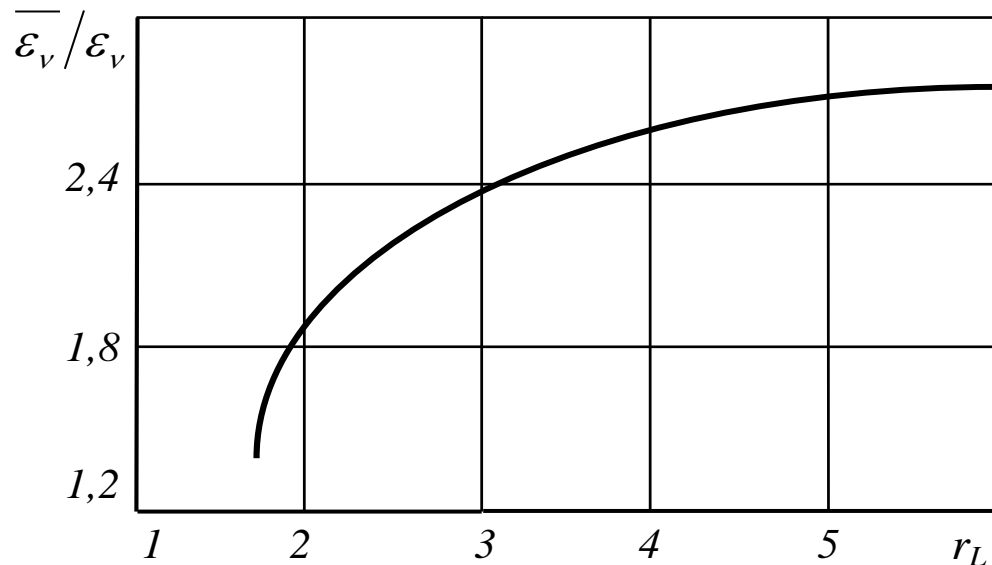


Рис.3.2. До визначення середньої величини об'ємного розпушення в пластичній області [68]

При цьому на основний напружений стан накладається деякий збуджений стан, що викликається зміною граничних умов. Компоненти цього стану позначимо двома штрихами. Рішення завдання шукаємо у вигляді:

$$\sigma_{[r]} = \sigma'_{[r]} + \sigma''_{[r]}; \quad \sigma_{[\theta]} = \sigma'_{[\theta]} + \sigma''_{[\theta]}; \quad \tau_{[r\theta]} = \tau'_{[r\theta]} + \tau''_{[r\theta]};$$

$$U_{[r]} = U'_{[r]} + U''_{[r]}; \quad U_{[\theta]} = U'_{[\theta]} + U''_{[\theta]}; \quad \sigma_r = \sigma'_r + \sigma''_r; \quad (3.12)$$

$$\sigma_\theta = \sigma'_\theta + \sigma''_\theta; \quad \tau_{r\theta} = \tau'_{r\theta} + \tau''_{r\theta}; \quad U_r = U'_r + U''_r; \quad U_\theta = U'_\theta + U''_\theta.$$

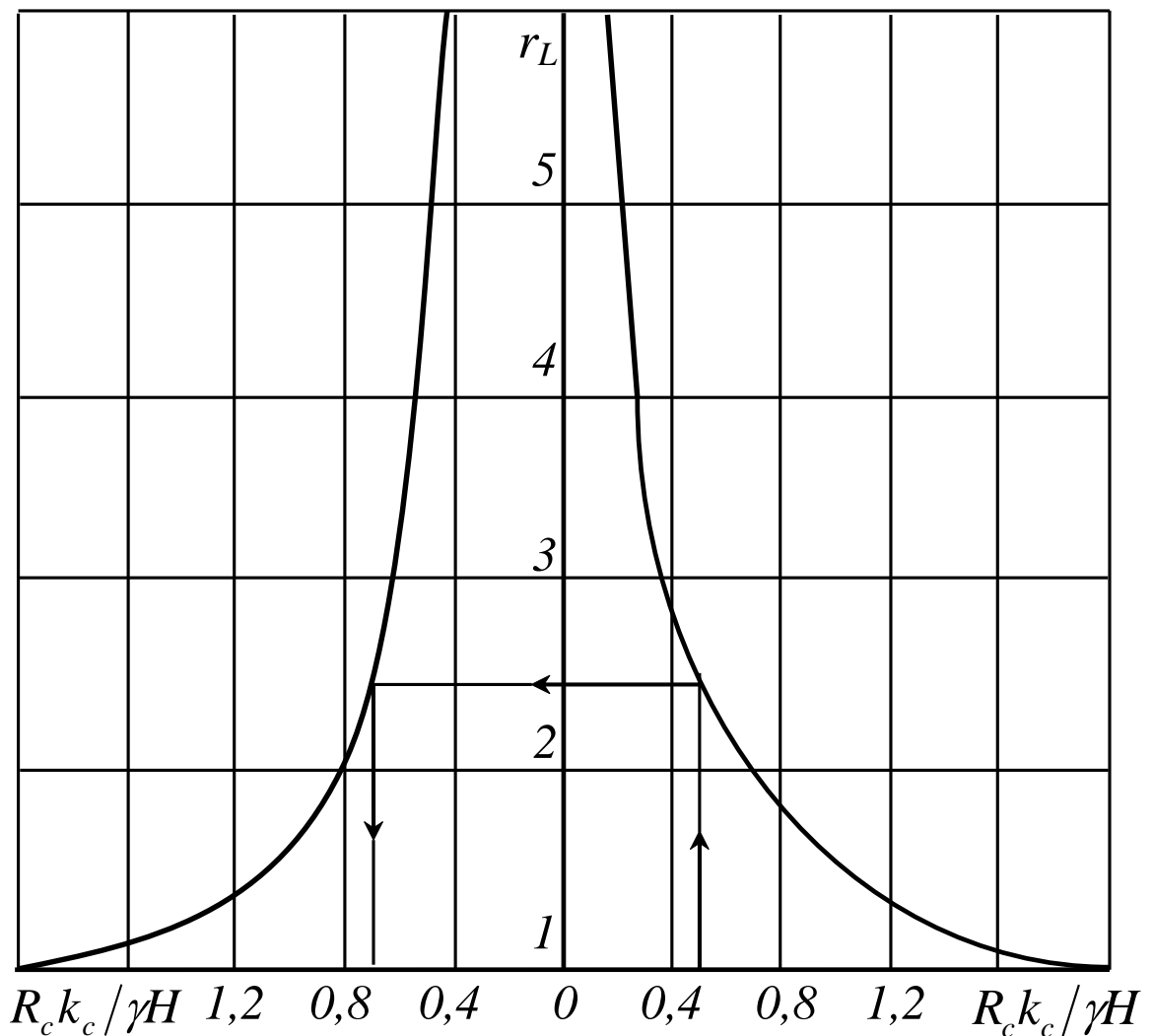


Рис. 3.3. До визначення середньої міцності порід в пластичній області [68]

Знаходимо компоненти напружень збудженого стану в пластичній області:

$$\sigma''_r = \frac{1}{r} (C_1 + C_2 (\ln r + 1)) \cos \theta, \quad (4.13)$$

$$\sigma''_\theta = \frac{1}{r} (C_1 + C_2 (\ln r + 1)) \cos \theta + \sqrt{2\gamma H \bar{R}_c}, \quad (3.14)$$

$$\tau''_{r\theta} = \frac{1}{r} (C_1 + C_2 \ln r) \sin \theta, \quad (3.15)$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – випадкові постійні інтегрування.

Напруги і переміщення для збудженого стану в пружній області мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma''_{[r]} &= -2 \frac{B}{r^3} \cos \theta; & \sigma''_{[\theta]} &= 2 \frac{B_1}{r^3} \cos \theta; & \tau''_{r\theta} &= -2 \frac{B_1}{r^3} \sin \theta; \\ U''_{[r]} &= \frac{B_1}{2Gr^2} \cos \theta; & U''_{[\theta]} &= \frac{B_1}{2Gr^2} \sin \theta. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Рівняння для визначення критичного радіуса зони непружних деформацій:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln^2 r_L^* - 2 - \frac{2\bar{R}_c}{G} (\ln r_L^* + 1) = 0. \quad (3.17)$$

Аналіз виразу (3.17) показав, що перший член його істотно (на два порядки) менше двох інших, внаслідок чого без практичної шкоди для точності воно може бути переписано в наступному вигляді:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln^2 r_L^* - 2 = 0. \quad (3.18)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3.18) і (3.6), знайдемо ту критичну глибину  $H^*$ , починаючи з якої у виробці відбудеться здимання порід підшви.

Результат графічного рішення рівнянь (3.49) і (3.17) показаний на рис. 3.4. Таким чином, поставлена задача вирішена.

Виконаємо аналіз основного виразу (3.18), що визначає можливість переходу породного масиву навколо виробки з одного стійкого рівноважного стану в інший, що супроводжується здиманням порід підпошви. Керуючими параметрами є відносне об'ємне розпушення порід, на контурі виробки  $\varepsilon_V^*$  і відносний критичний радіус області пластичних деформацій  $r_L^*$ . Їх добуток пропорційний величині непружних переміщень на контурі виробки.

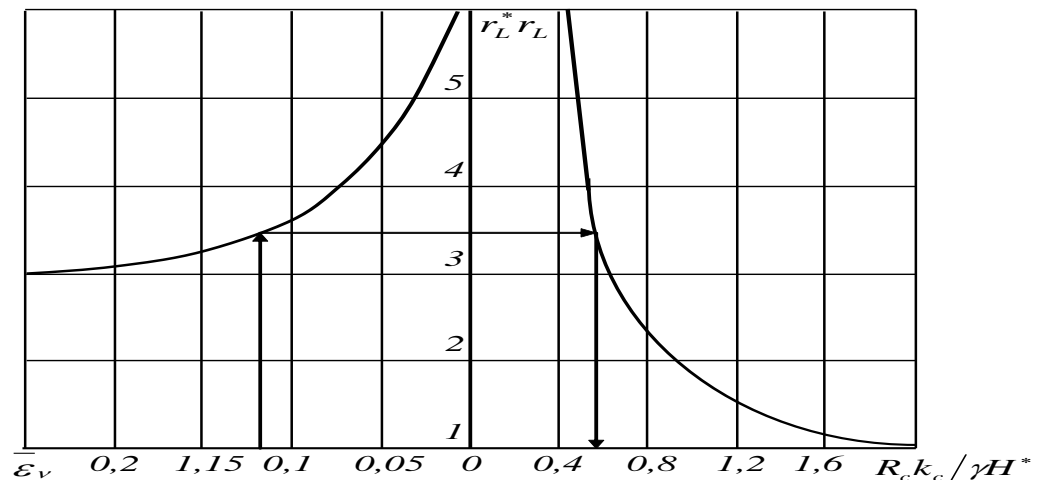


Рис. 3.4. До визначення критичної глибини розробки [68]

Фізична суть співвідношення (3.18) полягає в наступному. В процесі непружного розширення порід в замкнутому просторі з жорсткими зовнішніми розмірами ( $r = r_L$ ) відбувається переміщення внутрішнього контуру ( $r = 1$ ). До тих пір, поки ці переміщення не досягнуть деякої критичної величини, внутрішній контур зберігає первісну форму. При досягненні ж критичних значень переміщень

відбувається різке спотворення форми внутрішньої границі, що супроводжується зменшенням рівня потенційної енергії і великими переміщеннями на контурі виробки. Умова відсутності здимання порід ґрунту в виробці має вигляд:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln^2 r_L^* - 2 > 0. \quad (3.19)$$

Досягти стійкого стану порід ґрунту, як впливає з наведеного вище співвідношення, можна двома шляхами:

- 1) зменшуючи величину  $\varepsilon_v$ ;
- 2) зменшуючи величину  $r_L$ .

Зменшити величину радіуса області непружних деформацій можна тільки збільшивши міцність приконтурного масиву. Для цього можна, по-перше, виконати його зміцнення штучними або синтетичними в'язучими речовинами. Цей процес повинен бути реалізований в призабойному просторі до утворення області непружних деформацій, що не завжди можливо з технологічних і гірничо-геологічними причин. Особливо мало ймовірно ефективне виконання цього заходу в разі обводнених порід, що містять велику кількість глинистих частинок. Зміцнення приконтурного масиву в забої виробки може бути здійснено також шляхом установки анкерних болтів із закріпленням їх по всій довжині.

По-друге, досить ефективним заходом при існуючих глибинах розробки може виявитися ізоляція бічних порід, що перешкоджає порушенню їх природної водонасиченості і позбавляє можливість контакту з рудничною атмосферою. Відомо, що породи, намокаючи в відслоненнях, втрачають до 80% своєї початкової міцності.

Особливо це характерно для основних вуглемістких порід - аргилітів і алевролітів. На рис. 3.5 показані результати досліджень втрати міцності приконтурного масиву внаслідок підвищення його вологонасичення, наведені в роботі [22]. Видно, що підвищення вологості порід в 3 рази призводить до зниження

міцності порід на одновісний стиск в 5 ... 6 разів. При створенні ізолюючих покриттів може бути з успіхом застосована набризкбетонна технологія.

Моделювання здимання гірських порід показало, що цей процес розвивається значно менш інтенсивно в разі застосування замкнутих конструкцій кріплення. Ця ж обставина впливає безпосередньо з основного співвідношення (3.19).

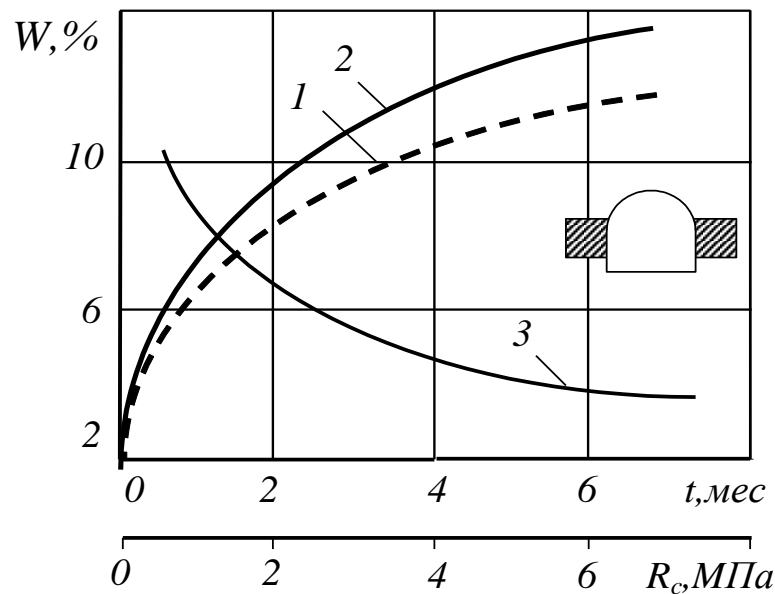


Рис. 3.5. Залежність вологонасичення порід від часу відбору (1, 2) і межі міцності на одновісний стиск (3) [68]

Як вже зазначалося, другий шлях управління станом приконтурного масиву полягає в зменшенні величини  $\varepsilon_V$ . Відповідні досліді по «жорсткому» деформуванню гірських порід в умовах об'ємного стиску, виконані, зокрема, під керівництвом А. Н. Ставрогіна [4], показали, що максимальна величина об'ємного розпушення дуже чутлива до наявності бічного тиску. Причому чим нижче міцність порід, тим сильніше позначається ефект підпору. У виробках роль бічного тиску



для приконтурного масиву грає відпор кріплення  $P_0$ . Аналіз графіків, зображених на рис. 3.6, показав, що вони досить добре описуються параболічною залежністю такого вигляду:

$$\varepsilon_V(P_0) = aP_0^2 + bP_0 + \varepsilon_v, \quad (3.20)$$

де  $a$ ,  $b$  - розмірні коефіцієнти, що характеризують особливості позамежного деформування гірських порід в умовах об'ємного стиснення. Наприклад, для пісчаника (див. рис. 3.6)  $a = 0,01$  МПа;  $b = -1,5$  МПа;  $\varepsilon_v = 60 \times 10^{-3}$ .

Таким чином, замкнуті конструкції кріплення, анкерування при одночасному покритті породного оголення ізолюючим шаром, наприклад, набризкбетону, можуть підвищити надійність функціонування капітальних гірничих виробок і дати істотний економічний ефект за рахунок зниження витрат на їх підтримку.

### 3.2. Методика моделювання процесу здимання порід підосви в підземних гірничих виробках

Моделювання явища здимання порід підосви протяжних виробок є складним завданням з точки зору дотримання основних постулатів механіки твердого деформованого середовища, до яких відносяться цілісність (континуальне середовище) і наявність досить малих переміщень. Тому сам процес моделювання штучно розбивається на дві частини:

- моделювання однорідного середовища, що вміщає виробку (виробки);
- моделювання шаруватого породного масиву, що вміщає виробку (виробки).

Моделювання однорідного середовища виконується таким чином, щоб його результати відповідали (були адекватні) реальному процесу. Умовно таке завдання є тестовим.

Для її вирішення використовується ліцензійний програмний продукт "Phase 2" канадської компанії Rocksiense, що дозволяє моделювати поетапне утворення виробок в напруженому середовищі. При цьому на кожній наступній стадії враховуються в якості початкових деформації, отримані на попередній стадії формування напружено-деформованого стану.

Для визначення зон руйнування навколо виробок використовувався критерій Хоека-Брауна. Його загальна формула має такий вигляд:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_a \frac{\sigma_3}{\sigma_{\bar{n}^3}} + s \right)^a, \quad (3.21)$$

де  $\sigma_1, \sigma_3$  - максимальні і мінімальні головні напруження в масиві,  $m_a$  - константа Хоека-Брауна для породного масиву,  $s$  та  $a$  - постійні величини, що враховують генезис і стан (якість) породного масиву,  $\sigma_{ci}$  - межа міцності на одновісний стиск масиву порід в інтактному стані [62].

Для породного масиву в інтактному стані критерій Хоека-Брауна зводиться до наступного виразу:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5}. \quad (3.22)$$

Тут константа  $m_i$  на відміну від константи  $m_a$  враховує тільки генезис і текстуру гірських порід ( $4 \leq m_i \leq 33$ ). Більша величина відповідає слабким породам, чим вона менша, тим більш пластичної є порода, а при  $m_i = 0$  має місце ідеальна пластичність.

За основу розробки методики моделювання процесу здимання порід ґрунту протяжних виробок взята біфуркаційних теорія (див. 3.1).

Відповідно до цієї теорії породний масив навколо одиночної виробки пластично розпушується. Після того, як зона непружних деформацій досягне

деякого критичного зовнішнього радіуса, виробка досить швидко втрачає свої початкові обриси, починаючи з підшви, яка зазвичай має плоску форму.

Умова, при якому виникла біфуркація геомеханічного стану, визначається виразом (3.18), а функція зв'язку між величинами, які входять в цю умову з достатньою точністю апроксимується залежністю:

$$r_L^* = 1 + \varepsilon_v^{0,4},$$

де  $\varepsilon_c$  - середня величина коефіцієнта об'ємного розпушення порід в приконтурній області,  $r_L^*$  - критичний відносний радіус ЗНД. Виробка буде стійкою за умови, що  $r_L < r_L^*$ .

Залежність критичного радіуса ЗНД від величини коефіцієнта розпушення порід приведена на рис. 3.6.

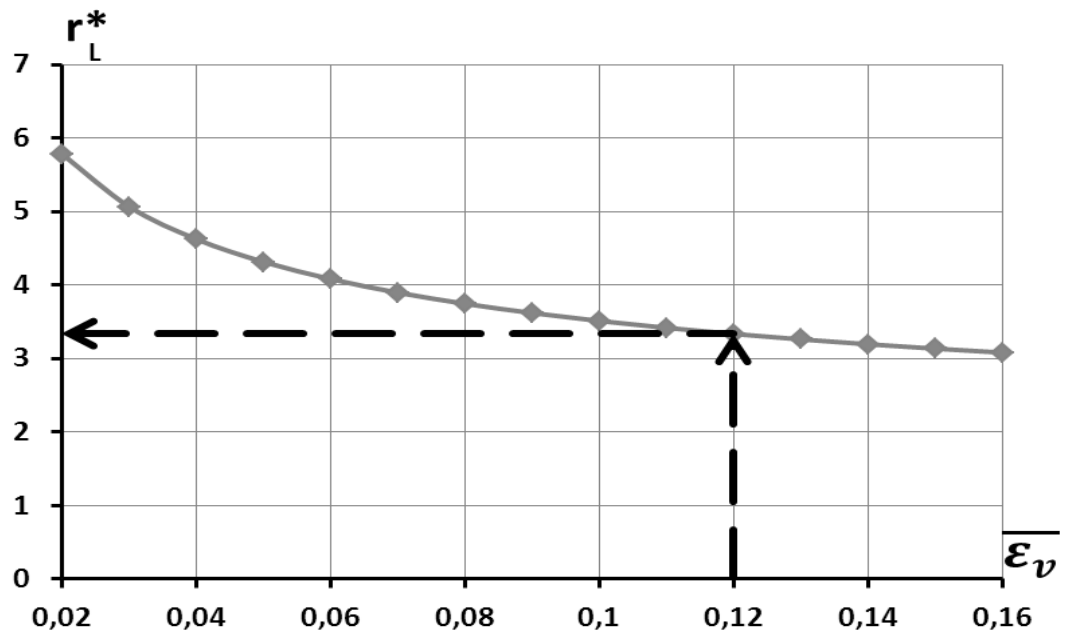


Рис. 3.6. Залежність критичного радіуса ЗНД від величини коефіцієнта розпушення порід [68]

Радіус ЗНД для конкретних гірничо-геологічних умов знаходиться на основі рівняння:

$$r_L = \exp\left(\sqrt{\frac{\gamma H}{2R_c k_c}} - 0,5\right), \quad (3.23)$$

де  $H$  - глибина розташування вироблення, м;  $\gamma$  - об'ємна маса гірських порід, т / м<sup>3</sup>;  $R_c$  - межа міцності порід на одновісний, МПа;  $k_c$  - коефіцієнт структурного ослаблення порід, що визначається за формулою:

$$k_c = 1 - \sqrt{0,5\eta} \exp(-0,25\eta), \quad (3.24)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{l_T + l_0}{l_T} (\eta_0^2 + 1)}, \quad (3.25)$$

де  $l_T$  - середні відстані між тріщинами,  $l_0$  - характерний розмір стандартного зразка гірських порід,  $\eta_0$  - коефіцієнт варіації випробувань стандартних зразків гірських порід.

Залежність радіусу ЗНД від геомеханічного показника умов розробки наведена на рис. 3.7.

Якщо в результаті розрахунків визначається, що  $r_L > r_L^*$ , то слід припустити, що велика ймовірність пружно-пластичній втрати стійкості геомеханічної системи «породний масив-виробка» і для подальшого її вивчення звичайний математичний апарат, який був застосований, є непридатним.

Для аналізу явища здимання порід ґрунту в підземних виробках підійдемо в такий спосіб. Використовуючи залежності (3.21) і (3.24), отримаємо вираз, на основі якого визначимо граничну глибину  $H^*$ , починаючи з якої у виробці виникне втрата пружно-пластичної стійкості приконтурного породного масиву:

$$H_{np} = \frac{2R_c k_c}{\gamma} \left( \ln(1 + \varepsilon_v^{0,4}) + 0,5 \right)^2, \quad (3.26)$$

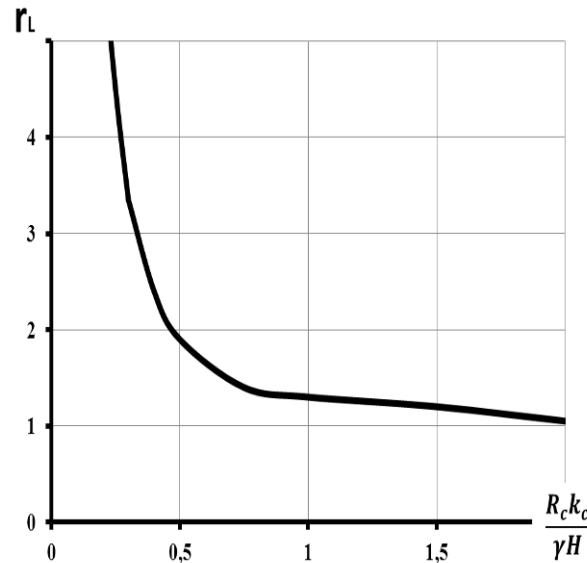


Рис. 3.7. Залежність радіусу ЗНД від геомеханічного показника  $r_L > r_L^*$  [68]

Для граничної глибини  $H^*$  на кінцево-елементній моделі визначимо параметри граничного пружно-пластичного стану: критичний радіус ЗНД  $r_L = r_L^*$  і переміщення виробки з боку підосви, покрівлі, боків  $-U^*$ . Для гірничо-геологічних умов ПСП «Шахта Степова» ці параметри складають  $H^* = 450$  м,  $r_L^* = 3,3$  м,  $U^* = 0,29$  м. Розрахункова схема і звичайно-елементна модель для розглянутих умов наведена на рис. 3.8.

На рис. 3.9 приведена форма критичної зони непружних деформацій навколо 7-го конвеєрного штреку, тієї його частини, яка знаходиться за межами впливу вибою лави, а на рис. 3.10 показані вектори переміщень приконтурного породного масиву. Точками вказані зони, які руйнуються від напруг, що розтягуються.

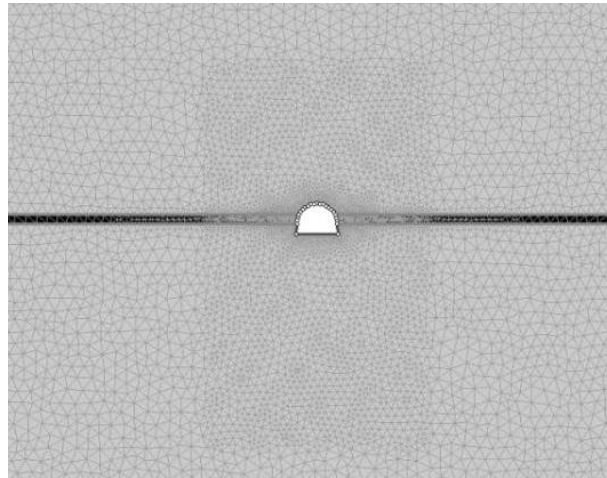


Рис. 3.8. Розрахункова схема і кінцево-елементна модель 2D-задачі

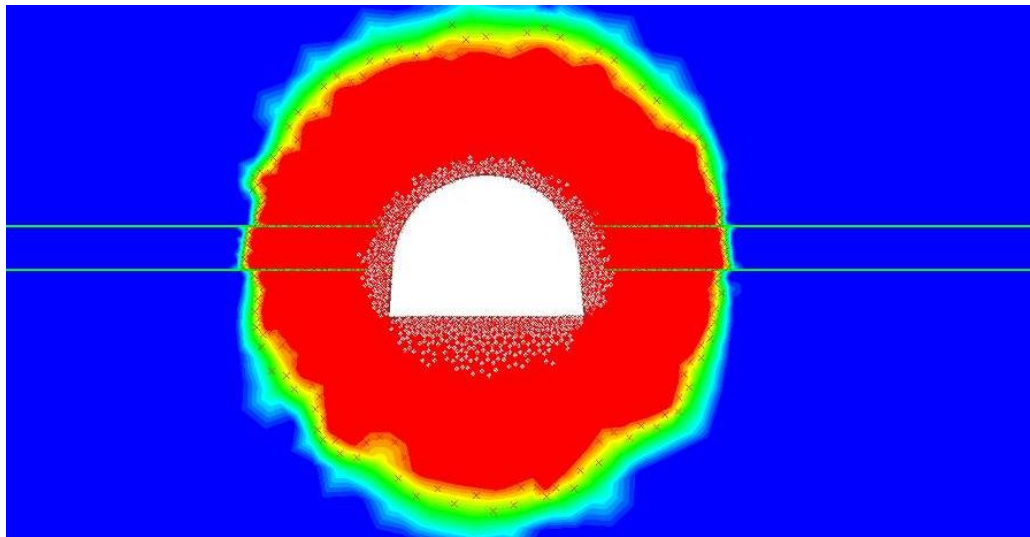


Рис. 3.9. Конфігурація зони непружних деформацій навколо одиночної виробки в незбудженому стані

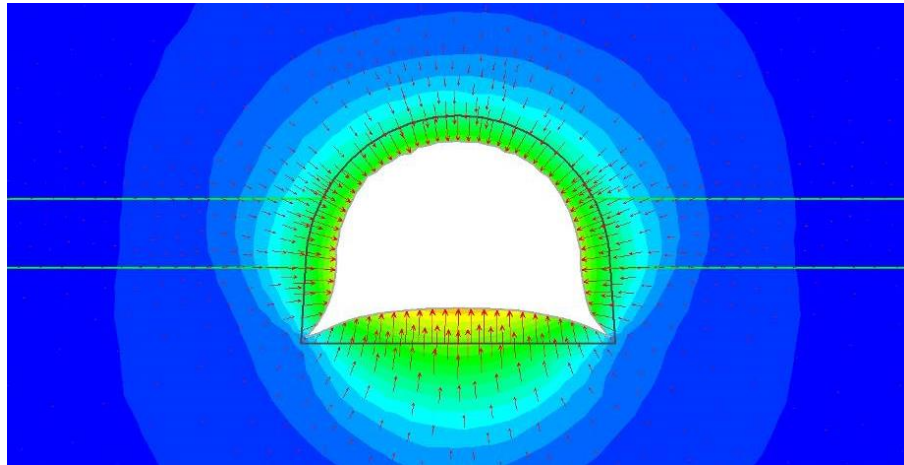


Рис. 3.10. Картина переміщень приконтурного породного масиву в незбудженому стані

Наступний штучний приріст переміщень в центрі підосви виробки на 0,01 м призводить до різкої зміни деформаційного стану порід, що залягають в підосві виробки (рис. 3.11).

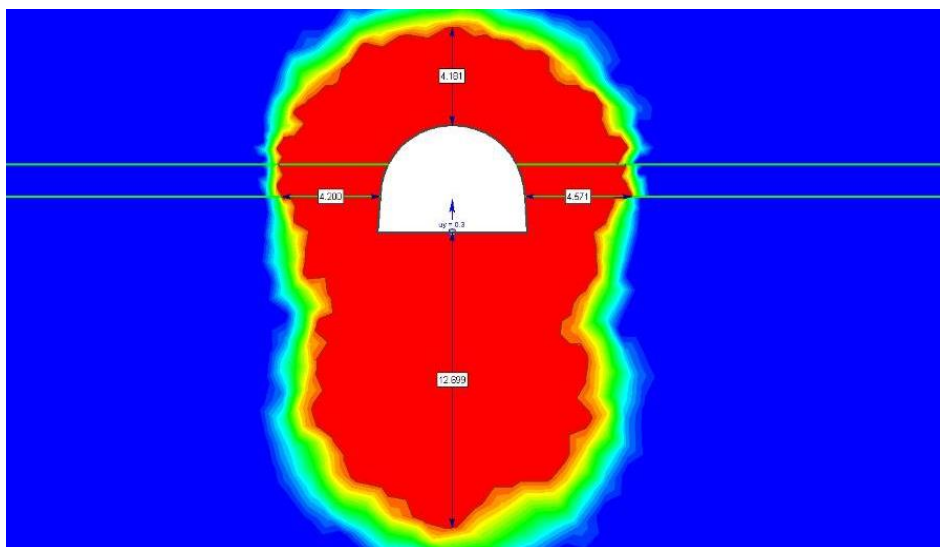


Рис. 3.11. Конфігурація ЗНД при підйомі вузла кінцево-елементної сітки, яка розташована в центрі підосви на 0,01 м (збуджений стан)

На рис. 3.12 показані переміщення породного масиву для цього випадку. При цьому приконтурний породний масив переходить в новий напружено-деформований стан з більш низьким рівнем потенційної енергії. Залежно від гірничо-геологічних умов цей стан може бути або рівноважним, коли процес здимання згодом припиняється, або квазірівноважним, що супроводжується безперервним перебігом розпушених порід з боку підосви (рис. 3.13).

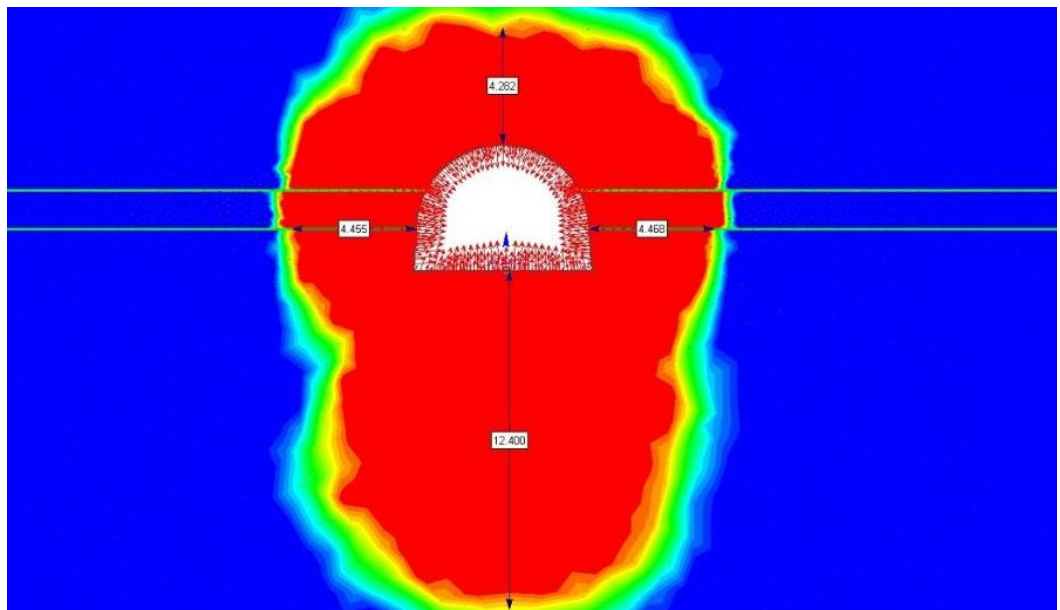


Рис. 3.12. Переміщення породного масиву навколо одиночної виробки в збудженому стані

Аналізуючи ЗНД, наведену на рис. 3.12, слід зазначити, що з боку підосви виробки параметри її істотно змінилися. Глибина ЗНД з боку підосви збільшилася майже втричі і тепер становить 12,106 м. У боках і покрівлі виробки розміри ЗНД залишилися практично без змін.



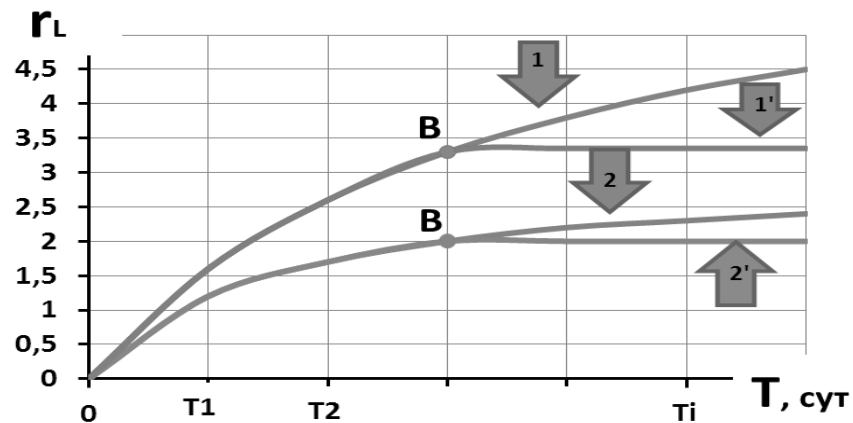


Рис. 3.13. Розвиток геомеханічних процесів навколо виробки: 1 - незгасаючий процес в підошві; 1' - незгасаючий процес в покрівлі; 2 - згасаючий процес в підошві; 2' - згасаючий процес в покрівлі; B - точка біфуркації [68]

На рис. 3.14 показана точка біфуркації *B* і подальший розвиток переміщень в покрівлі, боках, підошві виробки в момент втрати пружно-пластичної стійкості. З нього випливає, що після деякого критичного моменту геомеханічні процеси в покрівлі і боках виробки загасають, але активізуються в породах підошви.

На практиці це зазвичай супроводжується навіть деяким зменшенням обтиску кріплення і умовним зниженням навантаження на неї. У підошві ж виробки зона зруйнованих порід збільшується до 8-10  $R_0$  і цей процес, як вже на це зверталася увага вище, може носити або затухаючий або незатухаючий характер (див. рис. 3.13).

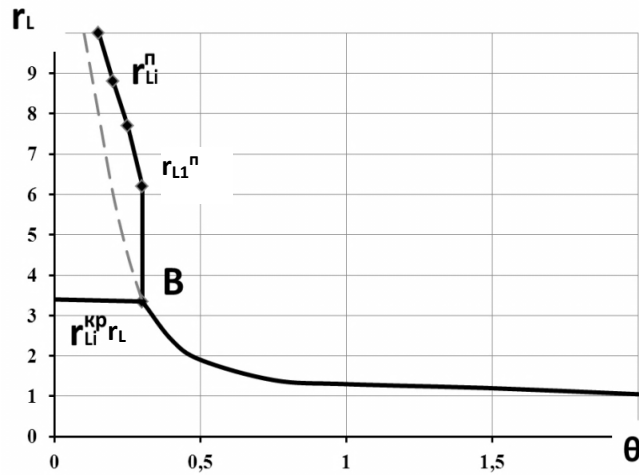


Рис. 3.14. Подальший розвиток переміщень в покрівлі і підшві виробки після досягнення точки біфуркації  $B$  [68]

Характерною точкою на контурі підшви вважатимемо точку  $A$  з максимальним вертикальним переміщенням в положення  $A'$  в момент досягнення критичної з точки зору втрати стійкості геомеханічного стану приконтурного масиву (рис. 3.15), коли:

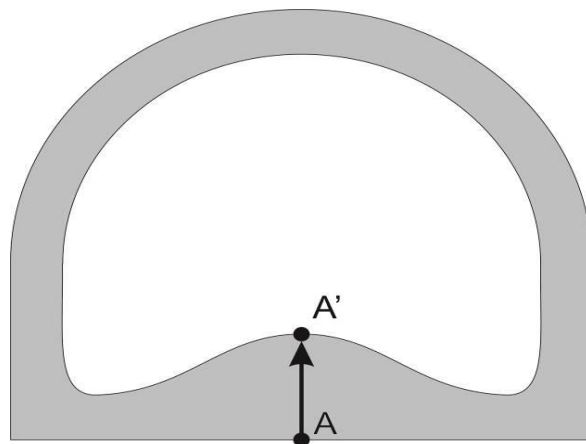


Рис. 3.15. Характерна точка  $A$  прикладання, яка збуджує переміщення в центрі підшви виробки [68]

На рис. 3.16 приведена залежність розмірів ЗНД в покрівлі, в боках і підшві виробки від величини розпочатого збудження переміщень  $U_3$ . З нього випливає, що миттєвий підйом характерної точки підшви  $A$  на величину від 0,1 до 0,2 м по досягненні критичного геомеханічного стану ( $r_L = r_L^*$ ) викликає втрату пружно-пластичної стійкості приконтурного масиву. Ця величина  $U_3 = 0,02$  м є достатньою для початку процесу і подальше її збільшення істотно не впливає на параметри геомеханічних процесів в приконтурному просторі.

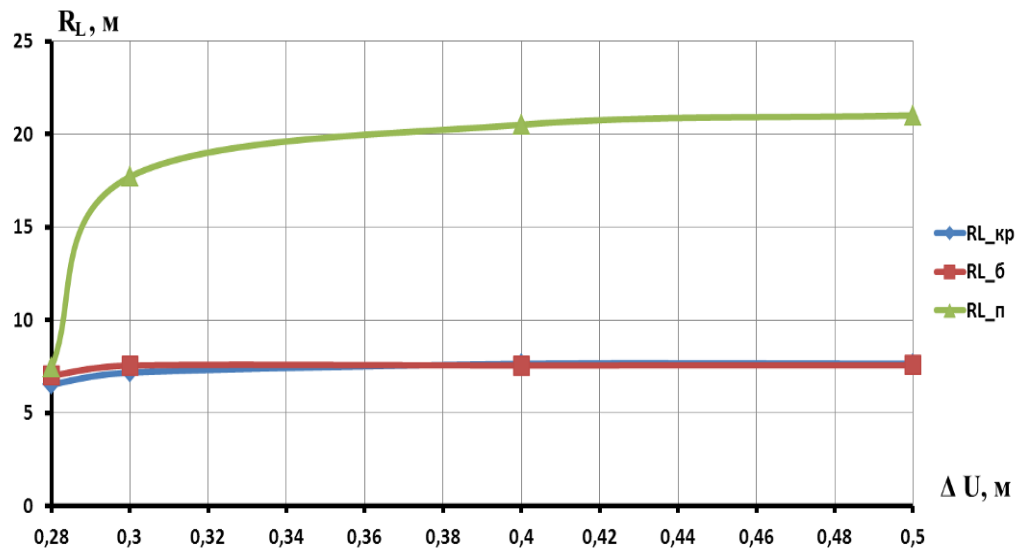


Рис. 3.16. Залежність розмірів ЗНД від величини штучного підйому вузла кінцево-елементної сітки [68]

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 3.16, дозволяє зробити наступний висновок: після втрати пружно-пластичної стійкості приконтурного породного масиву розміри ЗНД в покрівлі і боках одиночної виробки залишаються постійними, а в породах підшви спостерігається різке стрибкоподібне збільшення розміру ЗНД, величина якої досягає максимуму при збудженні переміщення,

рівному 0, 02 м, і практично не змінюється при подальшому збільшенні штучного деформування контуру.

Таким чином, при вирішенні завдання з визначення навантаження на кріплення одиночної виробки, яка формується деформаційними процесами в породах покрівлі, можна обмежитися рішенням пружно-пластичної задачі, не враховуючи деформаційні процеси в породах підшви.

### 3.3. Приклади численних моделей. Управління стійкістю підземних гірничих виробок із здимаючою підшвою

Для оцінки достовірності алгоритму пружних задач була вирішена відповідна задача про розподіл напружень в околиці отвору круглої форми, послабляючого пластину з однорідного ізотропного матеріалу, по зовнішньому контуру якого рівномірно розподілено навантаження інтенсивністю  $\gamma H$ , а по внутрішньому - відсіч кріплення, рівній  $p_0$ . Аналітичне рішення даного завдання викладено в [55], де для найпростішого випадку отримані формули для визначення тангенціальних і радіальних напружень:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \gamma H \left(1 - \frac{1}{r^2}\right), \\ \sigma_\theta &= \gamma H \left(1 + \frac{1}{r^2}\right).\end{aligned}\tag{3.27}$$

Рівняння (3.27) в точності відповідають рішенням задачі Ламе для визначення напруг в товстостінній трубі, навантаженою зовнішнім і внутрішнім тиском [181].

З рівнянь (3.28) випливає, що на контурі виробки при  $r=1$  та  $p_0=0$  має місце одинісний напружений стан:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0, \\ \sigma_\theta &= 2\gamma H.\end{aligned}\quad (3.28)$$

У такій же постановці з використанням ПК "Phase-2" була вирішена чисельна задача, результати якої представлені на рис. 3.17. Параметри розрахунків були наступними: виробка круглої форми з радіусом  $R_0 = 2,0$  м, знаходиться в ізотропному породному масиві на глибині  $H$ , що дорівнює 350 м. Питома вага вміщуючих порід  $\gamma = 2,50 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$ . До контуру виробки прикладене розподілене навантаження  $p_0$ , рівне відпору кріплення (в розрахунку прийнято  $p_0 = 0$ ). Визначалися тангенціальні  $\sigma_\theta$  і радіальні  $\sigma_r$  напруги.

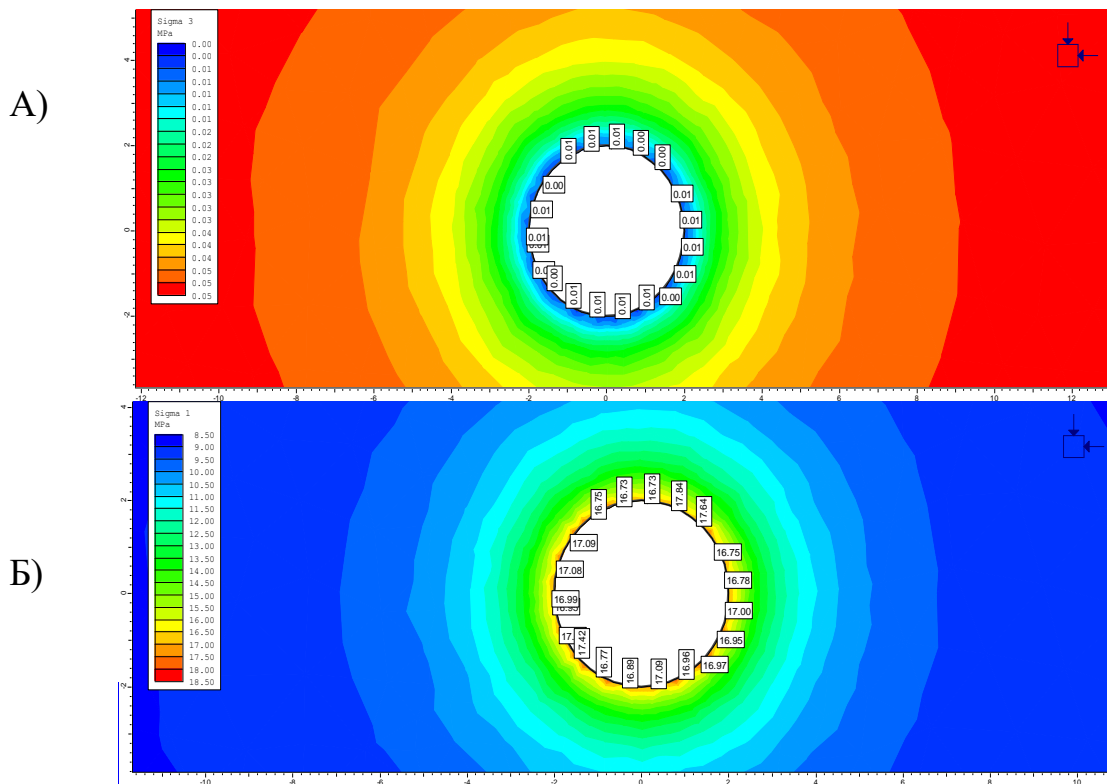


Рис.3.17. Розподіл радіальних (а) і тангенціальних (б) напруг на контурі круглої виробки при вирішенні пружної задачі

В [25,59,182] наведено аналітичне рішення пружнопластичної задачі плоского деформування для однорідного середовища навколо горизонтальної виробки круглої форми. Розглядалася довга горизонтальна виробка, яка пройдена в однорідному і ізотропному породному масиві. Граничні умови для даної задачі аналогічні умовам, заданим при вирішенні пружної задачі в п. 3.1: до контуру виробки прикладено розподілене навантаження  $p_0$ , рівне відпору кріплення, на нескінченності -  $\gamma H$ ; об'ємно-напружений стан - гідростатичний. Розрахунок проводився з застосуванням узагальненого критерію Хока - Брауна. Визначалися відносний радіус області непружних деформацій  $r_L$  і радіальні переміщення на контурі виробки  $U_0$ . Розрахункова схема задачі наведена на рис. 3.18.

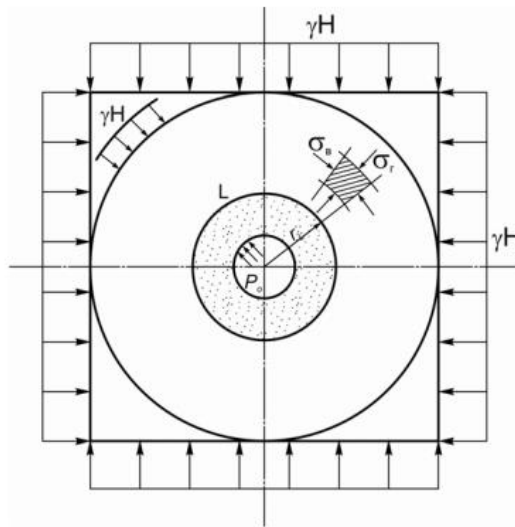


Рис. 3.18. Розрахункова схема для визначення напружень в околиці горизонтальної виробки (пружнопластична задача) [107]

Величини  $r_L$  та  $U_0$  встановлювалися в аналітичному вирішенні згідно з наступними рівняннями:

$$\frac{r^2_L \ln r_L}{r^2_L - 1} = \sqrt{\frac{\gamma H}{R_c k_c}} \quad U_0 = \varepsilon_v^* \left( 0,5 - \sqrt{\frac{\gamma H}{R_c k_c}} \right)$$

Виходячи з наведених вище виразів для визначення параметрів пружно-пластичного стану породного масиву в околиці одиночної виробки [25, 55, 182], можна встановити точкові значення імовірнісних за своєю природою величин: радіусу області непружних деформацій  $r_L$  і радіальних зсувів на контурі виробки  $U_0$ . В [25] для конкретного випадку (глибина розташування виробки  $H = 350$  м; межа міцності на одновісний  $\sigma_c = 25$  МПа; об'ємна вага  $\gamma = 2,50 \cdot 10^{-3}$  МН/м<sup>3</sup>; радіус виробки  $R_0 = 2,0$  м; коефіцієнт структурно механічного ослаблення  $k_c = 0,33$ ; граничне значення об'ємної деформації в умовах одновісного стиску  $\varepsilon_v^* = -0,1$ ) ці значення склали:  $r_L = 2,3$  м;  $U_0 = 0,38$  м.

При виконанні чисельного моделювання в ПК "Phase-2" були використані ті ж вихідні дані і створювалася розрахункова схема, максимально наближена до наведеної на рис. 3.18. На рис. 3.19. показана її кінцево-елементна реалізація.

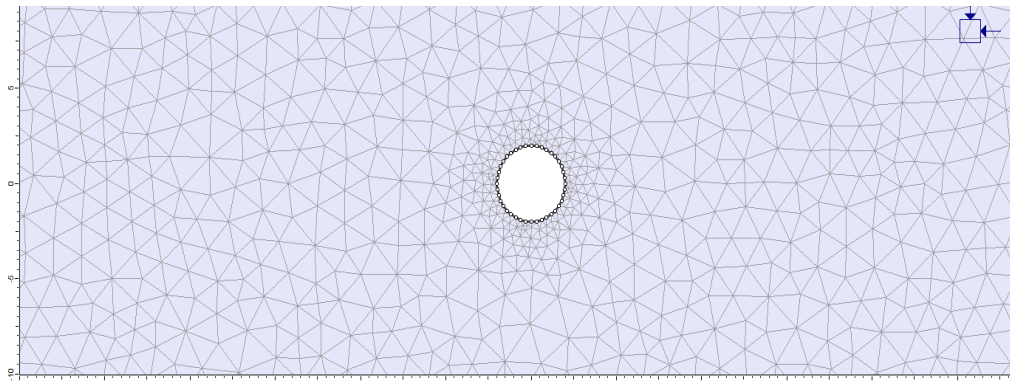


Рис. 3.19. Кінцево-елементна реалізація розрахункової схеми до задачі про визначення напружень в околиці горизонтальної виробки

Результати виконаного чисельного моделювання даної верифікаційної моделі представлені на рисунку 3.20.

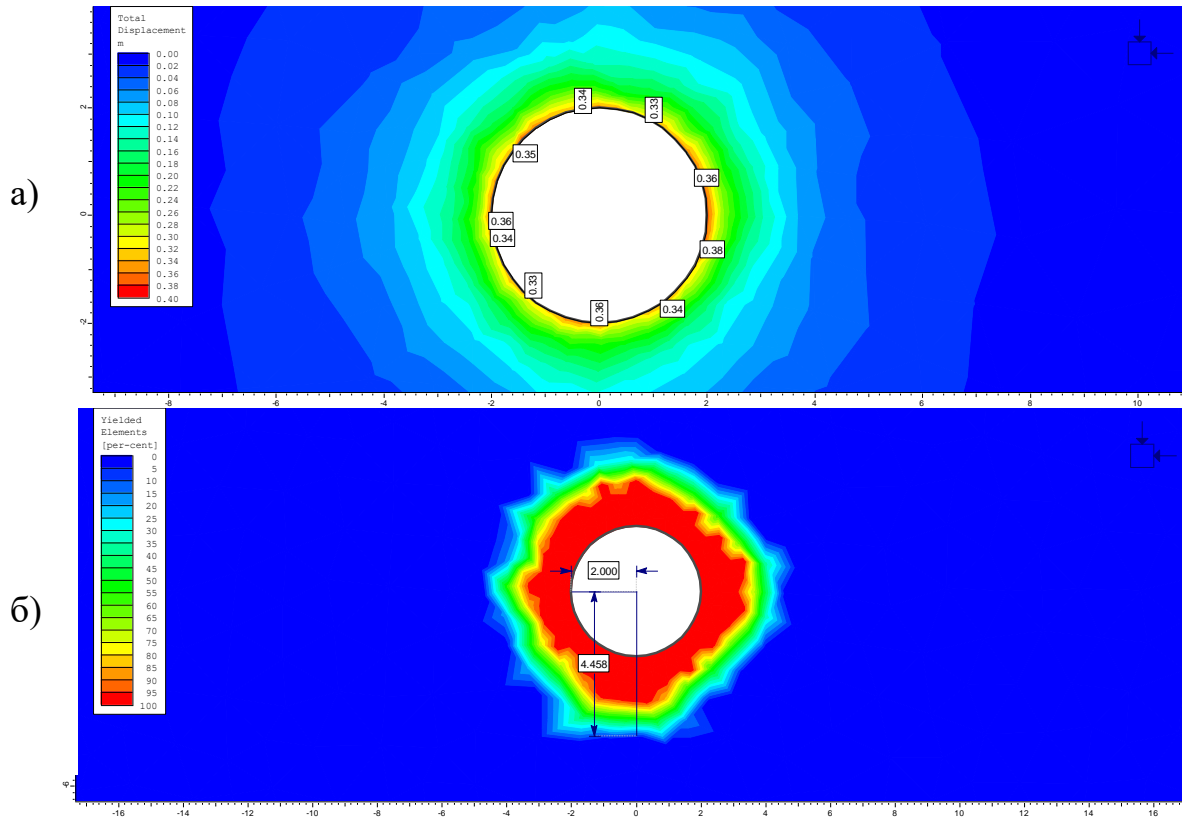


Рис. 3.20. Зміщення на контурі виробки (а) і область руйнування (б) при навантаженні одиночної виробки круглої форми

Аналіз розрахунків показав, що середнє значення величини радіальних переміщень на контурі виробки становить 0,35 м., а величина відносного радіуса області непружних деформацій  $r_L$  дорівнює 2,23. Тобто, порівнюючи отримані результати з аналітичними, можна зробити висновок, що розбіжності не перевищують 4% для  $U_0$  і 3% для  $r_L$ , що є допустимою похибкою.



Задача вирішується в пружно-пластичній постановці. Для умов поставленої задачі початкове поле напруг, що створюється вагою вищерозміщених порід для заданої глибини, становить:  $\sigma_y = \gamma H$ .

Тут  $\gamma = 24,3 \text{ кН/м}^3$  - об'ємна вага порід,  $H$  - глибина розробки, прийнята рівною 360 м. Кінцево-елементна апроксимація області здійснювалася за допомогою елементів-трикутників. Граничні умови задаються в переміщеннях: жорстко закріплюється нижня межа, тобто горизонтальні і вертикальні переміщення дорівнюють нулю; бічні вертикальні межі також закріплюють в горизонтальному напрямку (горизонтальні переміщення дорівнюють нулю). Шари порід, що вміщують задаються згідно літологічній колонці, представлений на рис. 3.21.

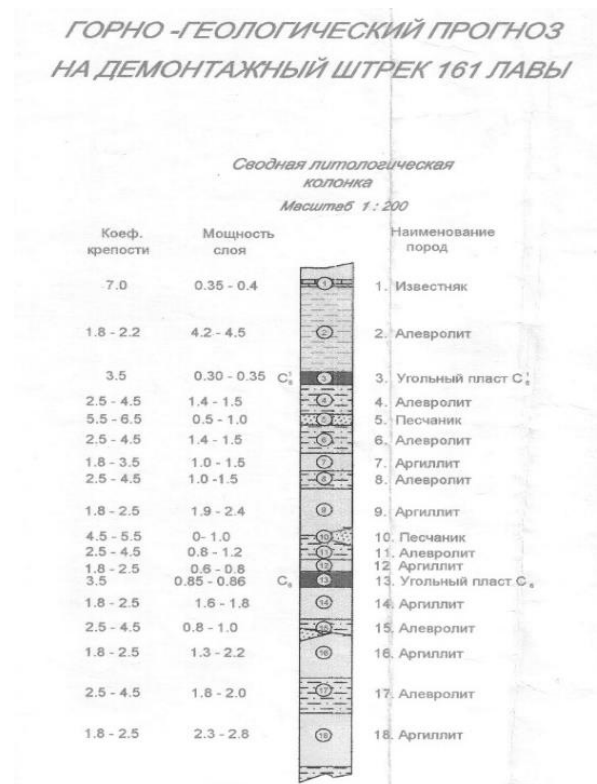


Рис. 3.21. Зведена літологічна колонка для демонтажного штреку 161-ої лави

Фізико-механічні властивості порід і вугілля, що моделюються в ході рішення чисельних задач, вказані в табл. 3.1. До розрахунку задачі приймалися фізико-механічні властивості аргілітів та алевролітів з представленого набору.

Таблиця 3.1

Фізико-механічні властивості порід, прийнятих при моделюванні

Назва характеристики	Вугілля	Аргіліт	Алевроліт	Піщаник
Модуль пружності (Юнга), $E$ , МПа	1175 5	2300	2750	4475
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,3	0,3	0,3	0,3
Міцність на стиск, $R_c$ , МПа	35	20	34	45

На розрахунковій схемі задачі відпрацьовувалися різні підходи до моделювання як елементів системи «виробка-кріплення», так і виконання власне процедури моделювання. Оскільки програма дозволяє виконувати моделювання різними підходами (постадійне розкриття виробки або моделювання шляхом вирішення в одну стадію), слід оцінити можливість застосування обох підходів до вирішення задач, поставлених у цій роботі.

Постадійний підхід дозволяє в плоскій постановці задачі провести симуляцію її 3-х мірної моделі, коли деформація масиву буде відбуватися поетапно, маючи на увазі, що з просуванням забою межі виробки продовжуватимуть деформуватися, а напруги будуть продовжувати змінюватися. Таким чином, в загальному вигляді виробка не досягає свого «двовірного» стану деформації, поки забій не просунеться вперед на відстань, рівну декільком напівпрогонам виробки. Схематично це показано на рис. 3.22.

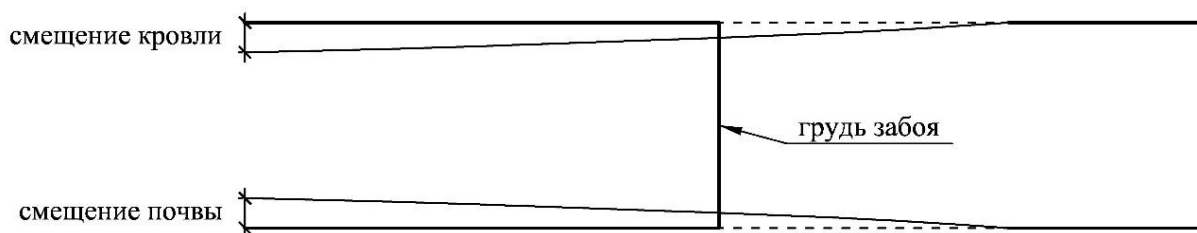


Рис. 3.22. До питання про реалізацію постадійного рішення чисельної задачі

Постадійний підхід може бути реалізований двома способами. Умовно назвемо перший спосіб постадійного моделювання - спосіб «розвантаження», а другий - спосіб «навантаження».

При способі «розвантаження» поетапне утворення виробки в непружному середовищі враховує на кожній наступній стадії в якості початкових ті деформації, які реалізовані на попередній стадії формування напружено-деформованого стану. Спосіб полягає в наступному: спочатку до контуру виробки прикладається розподілене навантаження, що дорівнює в даному випадку 8.755 МПа, ніж моделюється недоторканий масив по трасі виробки. На кожній наступній стадії величина цього навантаження поступово зменшується аж до повного її зняття на 24-й стадії, яка відповідає розкриттю виробки на повний переріз.

Другий спосіб - «навантаження», відрізняється від способу «розвантаження» наступним: спочатку моделюється масив, що вміщає виробку, який знаходиться в невагомому стані (навантаження, створене шаром верхніх порід, дорівнює нулю). На кожній наступній стадії величина навантаження поступово збільшується аж до повного навантаження на 24-й стадії до 8.755 МПа, що відповідає розкриттю виробки на повний переріз.

З огляду на те, що зона непружних деформацій (ЗНД) навколо розкритої в масиві виробки формується зі швидкістю звуку для даного середовища, тобто практично миттєво, розвиваючись надалі в частині розпушення і реалізації зсувів контуру виробки, фактично кріплення ставиться у виробці в умовах вже реалізованих початкових зсувів. Вони, хоча і невеликі, але вказують на зміну початкового НДС масиву в околиці виробки, що має бути враховано в побудові чисельної моделі.

Для того, щоб розрахувати, на якій стадії слід «поставити» в моделі кріплення, скористаємося формулою для зони непружних деформацій [64], ввівши в неї параметр  $k$  - коефіцієнт впливу забою:

$$r_L = \exp\left(\sqrt{\frac{k\gamma H}{2R_c k_c}} - 0,5\right), \quad (3.29)$$

, звідки:

$$k = \frac{2R_c k_c}{\gamma H} (\ln r_L^2 + 0,5)^2 \quad (3.30)$$

У рекомендаціях розробників програми прийнято допущення, що кріплення встановлюється безпосередньо в забої (при цьому деформації в забої становлять від однієї чверті до однієї третини так званих кінцевих деформацій, тобто тих, які відповідають деформацій, що стався при розкритті виробки на повний переріз). В

цьому випадку зміщення контуру, при яких встановлюється кріплення, знаходяться в діапазоні  $1/3 \dots 1/2$  кінцевих деформацій. У реальних же умовах рама кріплення зазвичай встановлюється на деякій відстані від вибою, витримується з міркувань зручності виконання робіт. Наприклад, в разі, якщо кріплення встановлюється в 1 м від забою коефіцієнт впливу приймає значення  $k = 0,4$ . Це відповідає 5-ій стадії чисельного рішення (тобто 40% кінцевих деформацій). Отже, для дотримання відповідності умов моделі фактичним технологічним регламентам кріплення, кріплення в моделі в цьому випадку слід встановлювати на 6-ій стадії розрахунку.

На рис. 3.23 показана картина розмірів області руйнування в околиці виробки для моделі, в якій для розглянутих умов розрахована величина коефіцієнта впливу забою.

Бібліотека кінцевих елементів програми дозволяє задавати спеціальні кінцеві елементи, які імітують роботу піддатливого рамного кріплення. При цьому є можливість задавати різний рівень піддатливості, який регулюється числом елементів піддатливості в конструкції рами і величиною піддатливості кожного такого елемента (вузла).

Задається так званий ступінь проковзування, що має зміст процентного зменшення початкової довжини лінійного кінцевого елемента, що імітує раму кріплення, тобто:

$$SG = \frac{n * \Delta L}{P}, \quad (3.31)$$

де  $\Delta L$  - величина нахльосту замків, мм;  $P$  - периметр кріплення, мм;  $SG$  - ступінь проковзування, %;  $n$  - кількість елементів піддатливості на рамі, шт.

Тоді, для трьохланкового аркового кріплення КМП-А3, величина проковзування, що задається в моделі кріплення, відповідно до (3.58), складе 8%.

Розглянемо можливість застосування одно- та багатадійного рішення до вирішення задач, поставлених у роботі, для чого порівняємо результати рішення для одиночної виробки в даній моделі з урахуванням і без урахування установки рамного кріплення.

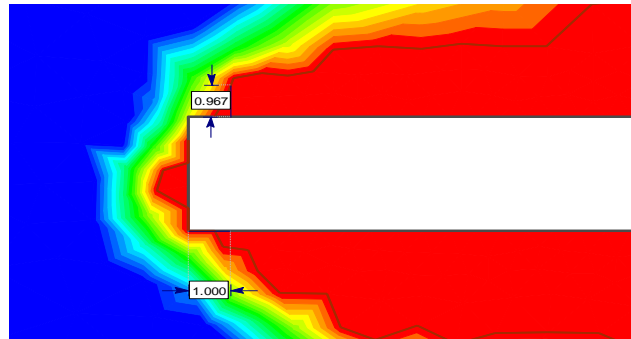


Рис. 3.23. До розрахунку величини коефіцієнта впливу вибою

Зміщення контуру виробки при вирішенні задачі про переміщення на контурі виробки, розв'язуваної одностадійно, представлена на рис. 3.24.

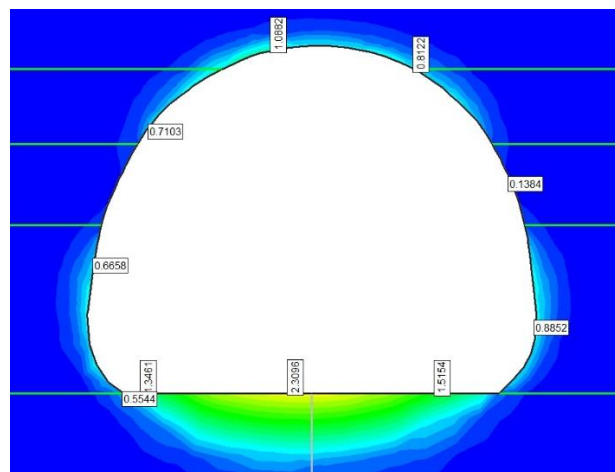


Рис. 3.24. Переміщення контуру виробки при вирішенні одностадійної тестової задачі (без урахування кріплення)

Як видно з рис. 3.24, переміщення на контурі виробки в покрівлі та підосві становлять відповідно 1,08 м і 2,3 м.

На рис. 3.25, а приведена кінцево-елементна модель для задачі про переміщення на контурі виробки, вирішена із застосуванням багатостадійного підходу (24 стадії). На рис. 3.25, б приведена картина переміщень при навантаженні за таким підходом одиночної виробки без урахування відпору кріплення. Переміщення на контурі на останній стадії в даній задачі становили 0,3 м в покрівлі і 0,6 м в підосві, що менше в порівнянні з рішенням в одну стадію.

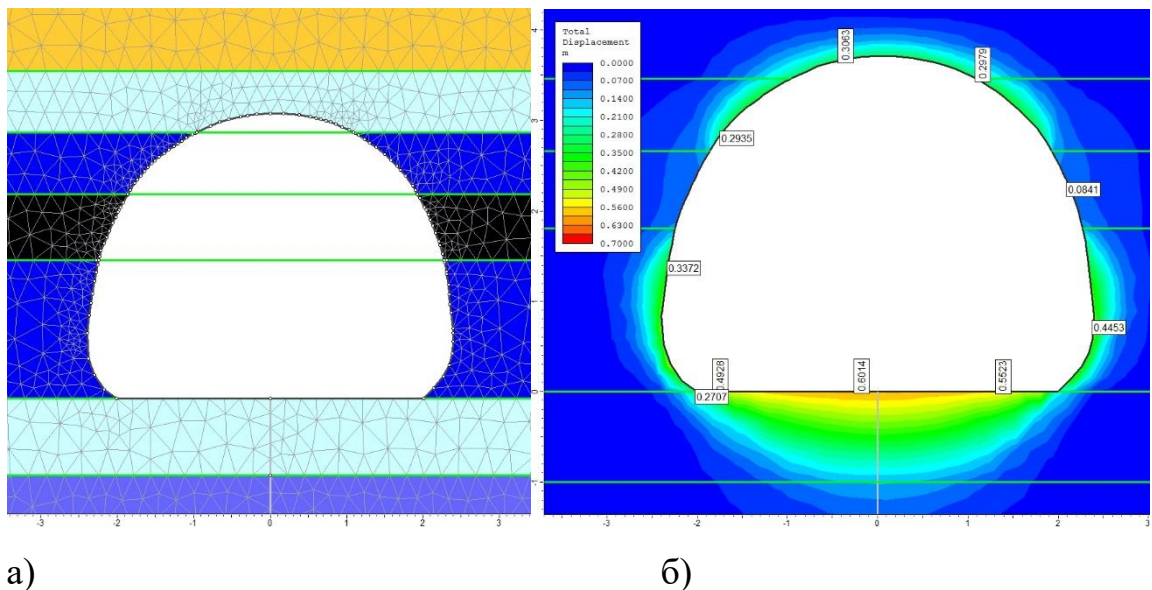


Рис. 3.25. Кінцево-елементна модель (а) і картина переміщень (б) при навантаженні для вирішення задачі про переміщення на контурі виробки шляхом багатостадійного підходу (без урахування кріплення)

Наступним кроком при вирішенні задачі було визначення НДС в околиці одиночної виробки з урахуванням встановленого в ній рамного кріплення з профілю СВП-27.

Кінцево-елементна модель і область руйнування при навантаженні для багатостадійного (24 стадії) рішення наведені на рис. 3.26.

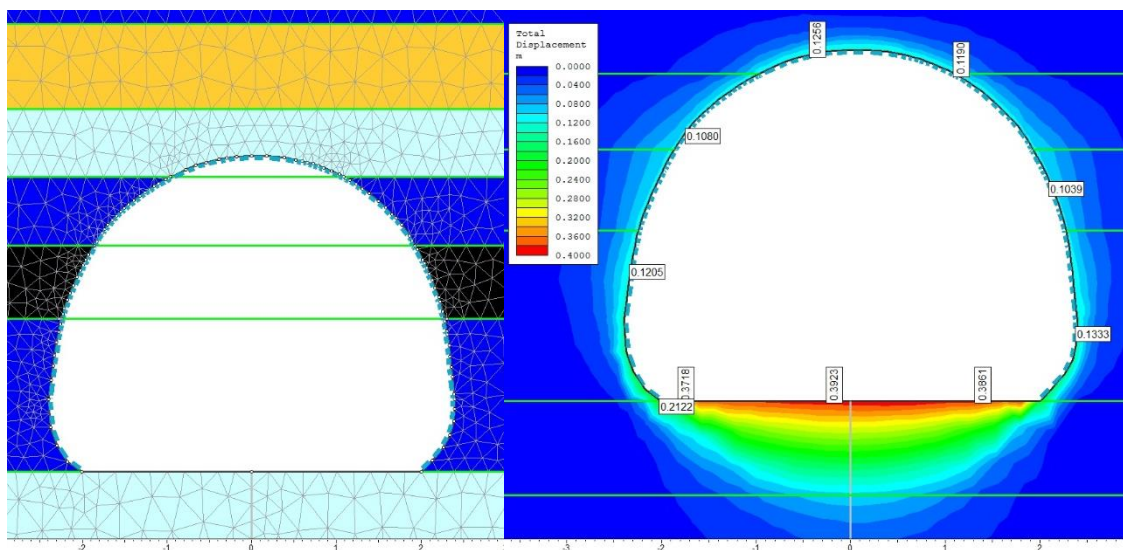


Рис. 3.26. Кінцево-елементна модель одиночної виробки з урахуванням рамного кріплення (а) і картина переміщень (б) при багатостадійному вирішенні

Як видно, при одностадійному вирішенні зміщення на контурі виробки на покрівлі та підшві склали 0,12 м і 0,39 м відповідно, що вказує на вплив встановленої рами на НДС моделі на околиці виробки (зміщення зменшилися на 2,5 рази і 1,54 рази відповідно).

При багатостадійному вирішенні на 24-й стадії в покрівлі виробки отримані зміщення, рівні 0,12 м, а в підшві - 0,39 м, що менше відносно випадку без кріплення (на 24-й стадії) в 2,5 і 1,54 рази відповідно. Порівняння отриманих чисельних результатів з результатами натурних спостережень для випадку відсутності впливу лави (табл. 3.2.) Показує, що результати многостадійного рішення ближче до отриманих при натурних спостереженнях на етапі поза впливом лави, тобто результати, отримані при многостадійному рішенні краще корелюють з



результатами натурних спостережень в схожих гірничо-геологічних умовах, ніж результати одностадійного рішення.

Таблиця 3.2

Порівняння впливу стадійності рішення чисельної задачі, з урахуванням кріплення на результати

Показник	Одностадійне вирішення	Багатостадійне вирішення	Натурні вимірювання
Переміщення в покрівлі, м	1,08	0,12	0,11
Переміщення в підшві, м	2,3	0,39	0,42

Розмір і конфігурація зони непружних деформацій для багатостадійного рішення задачі із заданим кріпленням СВП-27 представлені на рис 3.27.

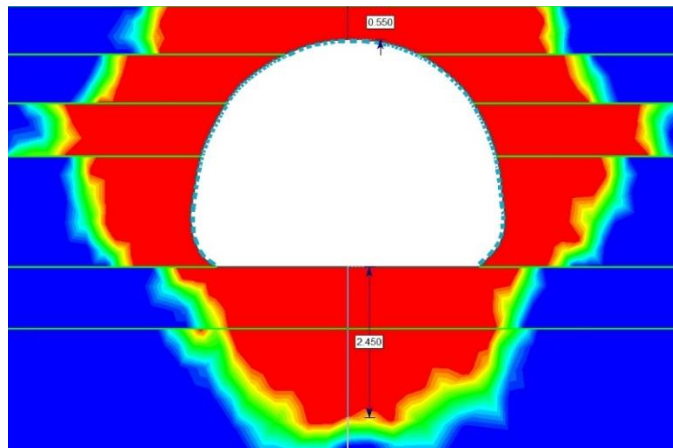


Рис. 3.27. Розмір і конфігурація зони непружних деформацій

Що стосується виконання завдання багатостадійним підходом із заданим кріпленням переміщення на контурі виробки близькі до переміщень, отриманим при натурних дослідженнях, а розмір зони непружних деформацій значно менше. Переміщення, аналогічні отриманим при багатостадійному вирішенні задачі із заданим кріпленням СВП-27, задані вручну для підшви виробки, збільшили розмір зони непружних деформацій на підшві до 3,2 м, розмір зони непружних деформацій у покрівлі залишився незмінним, що представлено на рис. 3.28.

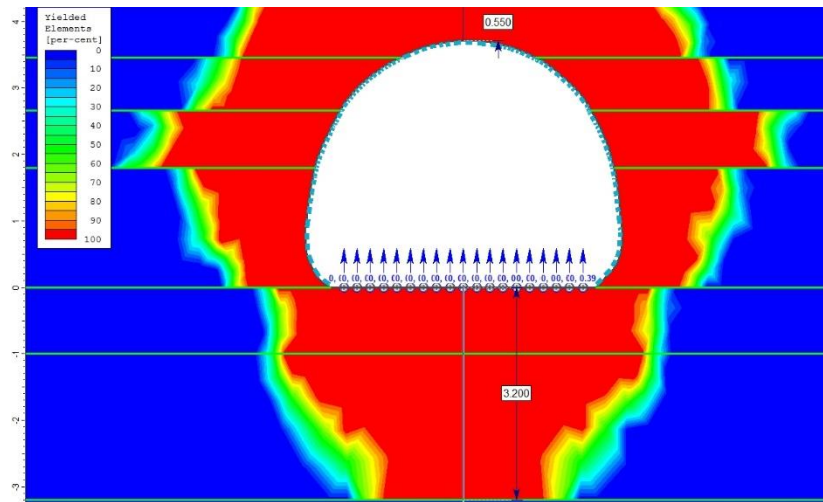


Рис. 3.28. Розмір зони непружних деформацій для задачі з заданими переміщеннями підшви

Розмір зони непружних деформацій у підшві виробки при штучному завданні переміщень збільшився на 0,75 м, що значно ближче до реальної ситуації у породному масиві. Далі було розглянуто вплив збільшення переміщень у підшві на величину зони непружних деформацій. Максимальних переміщень підшва виробки досягає в центрі, і зменшується до країв, зберігаючи пропорції початкової моделі.

На рис. 3.29 - 3.33. Представлені розміри зони непружних деформацій в задачах, де пікові переміщення підосви склали 0,5; 0,7; 1,0; 1,2 і 1,4 м відповідно.

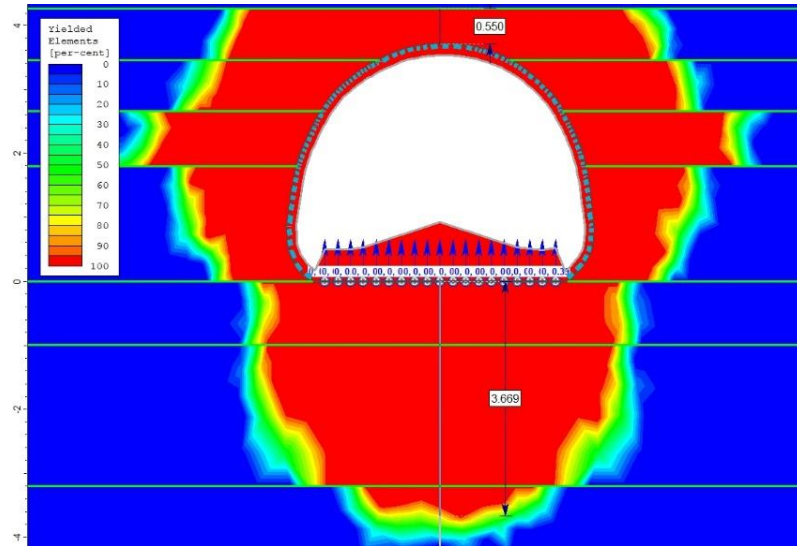


Рис. 3.29. Розмір і конфігурація зони непружних деформацій для переміщень підосви, які дорівнюють 0,5 м

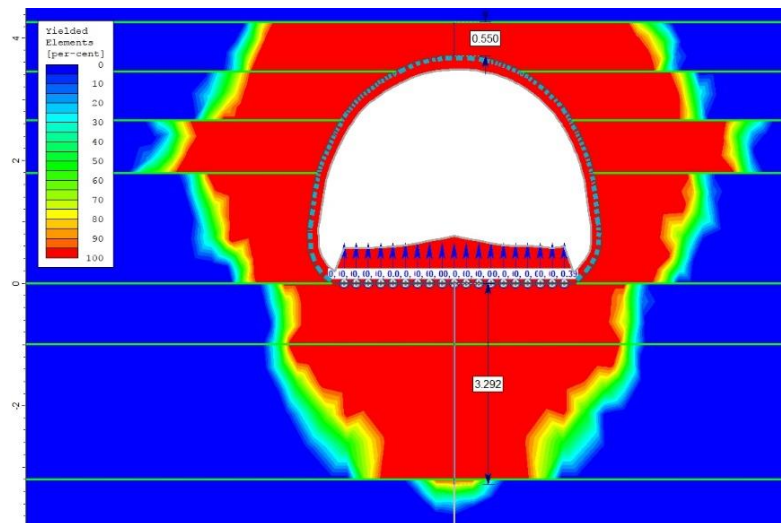


Рис. 3.30. Розмір і конфігурація зони непружних деформацій для переміщень підосви, які дорівнюють 0,7 м

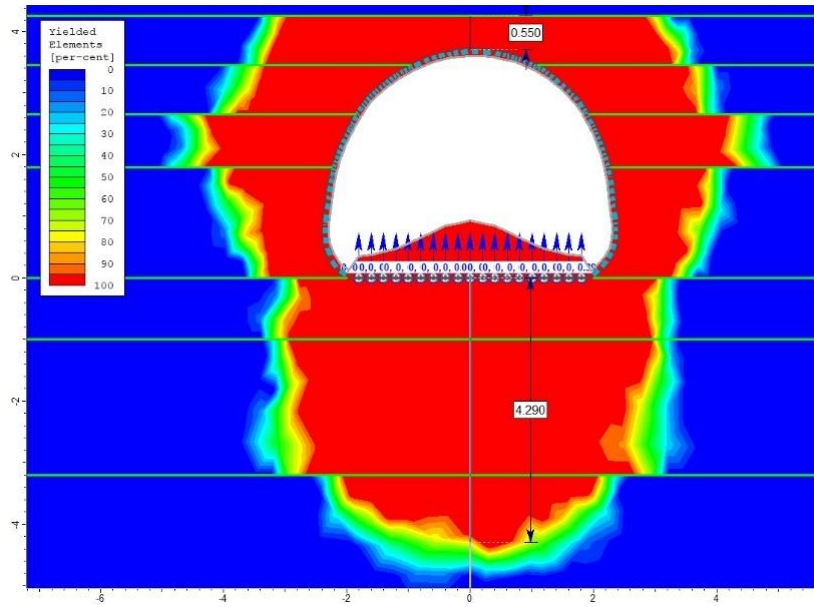


Рис. 3.31. Розмір і конфігурація зони непружних деформацій для переміщень підосви, які дорівнюють 1,0 м

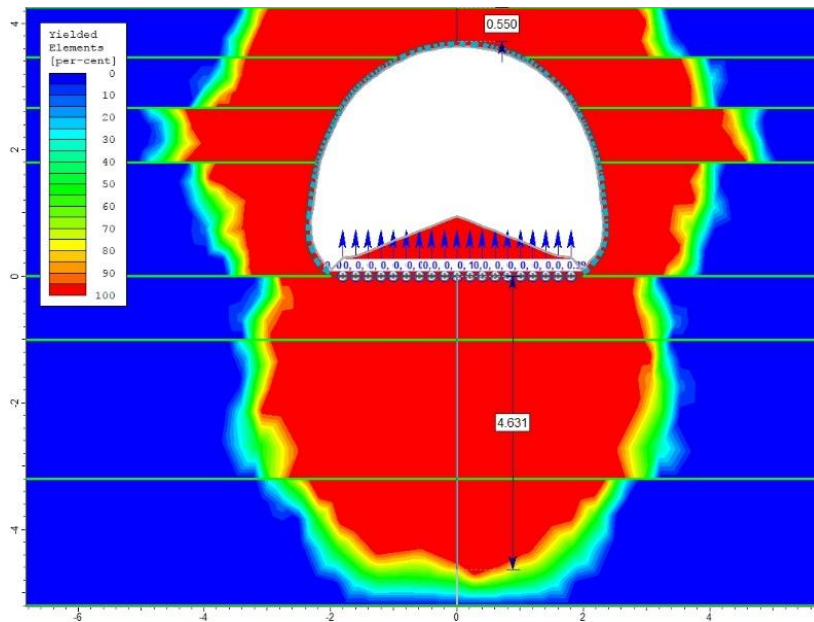


Рис. 3.32. Розмір і конфігурація зони непружних деформацій для переміщень підосви, які дорівнюють 1,2 м

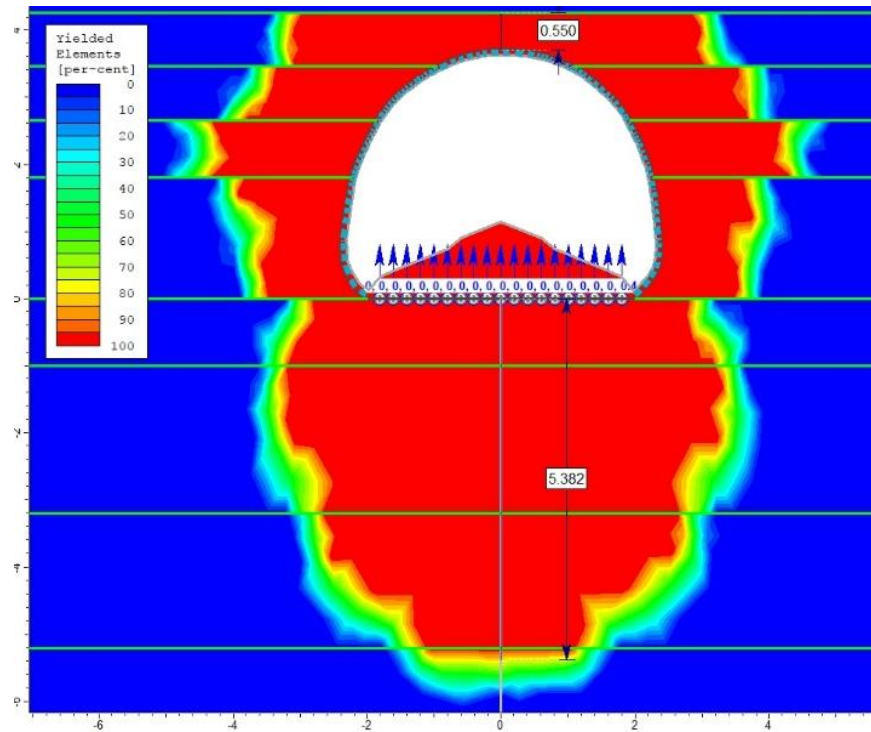


Рис. 3.33. Розмір і конфігурація зони непружних деформацій для переміщень підосви, які дорівнюють 1,4 м

Також були розглянуті випадки штучного підняття підосви на 0,4; 0,6; 0,8; 0,9; 1,1; 1,3 і 1,5 м. Таким чином, підосва виробки піднімалася з кроком в 0,1 м в діапазоні від 0,4 м до 1,5 м. Динаміка зміни радіуса зони непружних деформацій в ґрунті і покрівлі виробки представлені на рис. 3.34.

Узагальнюючи результати чисельних експериментів, слід зазначити, що штучне додавання переміщень до контуру виробки викликає різку зміну глибини зони непружних деформацій в підосві (приблизно, в 3-4 рази) і практично абсолютно не позначається на розмірах зруйнованих порід в покрівлі (= const).

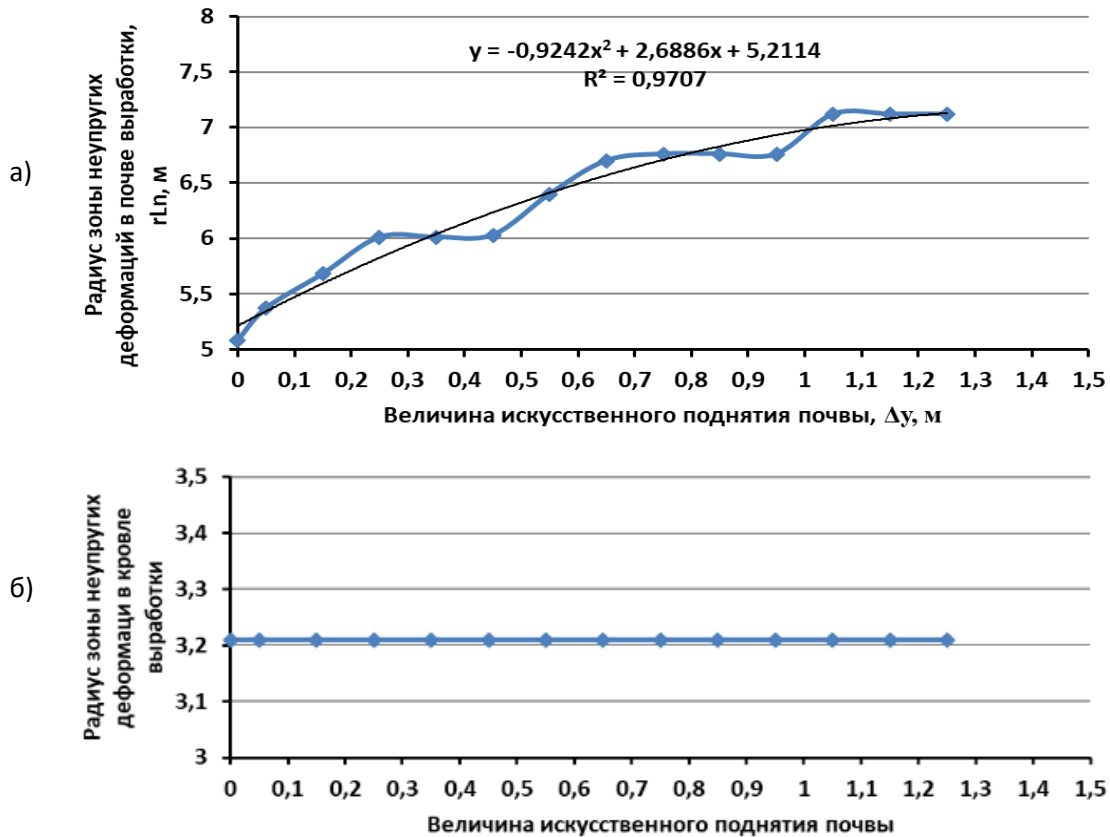


Рис. 3.34. Динаміка змін радіуса зони непружних деформацій в підосві (а) і в покрівлі (б) виробки

Цю обставину відображено на рис. 3.34. З нього випливає також, що динаміка зростання глибини зони непружних деформацій в підосві носить нелінійний характер і підпорядковується наступній залежності:

$$r_{L_n} = -0,9242 \Delta y^2 + 2,6886 \Delta y + 5,2114, \quad (3.63)$$

при  $R^2 = 0,9707$ .

Саме такий характер деформування приконтурного масиву навколо одиночних виробок підтверджується натурними вимірами [68]. Це говорить про адекватність досліджуваних чисельних моделей реально протікаючому геомеханічному процесу.

## ВИСНОВКИ

- 1) Розроблено методику чисельного моделювання процесу здимання порід підшоши магістральних виробок;
- 2) Встановлено нелінійний характер протікання процесів руйнування порід підшоши;
- 3) Доведено, в першому наближенні, адекватність досліджуваних геомеханічних моделей реально протікаючому процесу здимання порід підшоши в підземних виробках.

## ВИСНОВОК

Дана магістерська робота є завершеною науково-дослідною роботою, у якій виконано імітацію процесу здимання порід підшоши гірничої виробки на числових (цифрових) моделях для неоднорідного (шаруватого) масиву шляхом штучного задання переміщень у підшошві гірничої виробки.

Основні наукові і практичні результати досліджень полягають у наступному:

- 1) Описано типи та види проявів гірського тиску при підземній розробці корисних копалин;
- 2) Розглянуті і проаналізовані різні гіпотези і моделі здимання;
- 3) Надано описи останніх вітчизняних теорій та їх аналіз;
- 4) Проаналізовано сучасні способи боротьби з проявами здимання.
- 5) Надано та описано конструкцію вимірювальних станцій і приведена методика спостережень за ними;
- 6) Проаналізовано та оброблено результати натурних вимірювань.
- 7) Розроблено методику цифрового моделювання процесу здимання порід підшоши магістральних виробок вугільних шахт.
- 8) Встановлено нелінійний характер протікання процесів руйнування порід підшоши;
- 9) Доведено, в першому наближенні, адекватність досліджуваних геомеханічних моделей реально протікаючому процесу здимання порід підшоши в підземних виробках.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Руководство по проведению испытаний слабых пород на боковой распор. – Л.: Изд-во ВНИМИ, 1961. – 68с.
2. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовых масс / Н.М. Герсеванов.— М.: Стройиздат, 1937. – 241 с.
3. Ержанов Ж.С. Экспериментальное определение коэффициента бокового давления / Ж.С. Ержанов, А.С. Сагинов, Ю.А. Векслер // Измерение напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1971. – С. 71-76.
4. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979.— 301 с.
5. Матвеев Б.В. Руководство по механическим испытаниям горных пород методом соосных пуансонов / Б.В. Матвеев. – Л.: Изд-во ВНИМИ, 1960. – 80 с.
6. Стрельцов Е.В. О креплении капитальных выработок шахт Центрального района Донбасса / Е.В. Стрельцов. – Шахтное строительство. – 1972. – № 9. – С. 17-21.
7. Глушко В.Т. Проявление горного давления в глубоких шахтах / В.Т. Глушко. – К.: Наук. думка, 1971. – 195 с.
8. Глушко В.Т. Геология горного массива / В.Т. Глушко, В.П. Чередниченко, В.С. Усаченко. – К.: Наук. думка, 1987. – 172 с.
9. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок / Б.М. Усаченко. – К.: Наук. думка, 1979. – 135 с.
10. Тупиков Б.Т. Оценка технологии поддержания участковых выработок, проводимых за очистным забоем / Б.Т. Тупиков, В.М. Андриенко // Уголь Украины. – 1997. – №12. – С.10-13.

11. Гузь А.Н. Устойчивость упругих тел при всестороннем сжатии / А.Н. Гузь // Прикладная механика. – 1976. – Т. 12, № 6. – С. 3-32.
12. Гузь А.Н. О трехмерной теории устойчивости деформируемых тел. Устойчивость элементов конструкций / А.Н. Гузь // Прикладная механика. – 1986. – № 2. – С. 3-16.
13. Гузь А.Н. Основы трехмерной теории устойчивости деформируемых тел / А.Н. Гузь. – К.: Вища школа, 1986. – 511 с.
14. Ершов Л.В. Введение в механику горных пород / Л.В. Ершов, В.А. Максимов. – М.: Недра, 1976. – 219 с.
15. Насонов Л.Н. Применение быстродействующих электронных цифровых машин к решению задач горного давления в одиночных штрекообразных выработках / Л.Н. Насонов // Аналитические методы исследований и математическое моделирование горных процессов. – М., 1963. – С. 43-54.
16. Алимжанов М.Т. Устойчивость равновесия тел и некоторые задачи горного давления / М.Т. Алимжанов, Л.В. Ершов // Проблемы механики твердого деформируемого тела. – Л., 1970. – С. 47-54.
17. Ишлинский А.К. Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости / А.К. Ишлинский // Украинский математический журнал. – 1954. – Т. 6, № 2. – С. 140-146.
18. Лейбензон Л.С. О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек / Л.С. Лейбензон. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. 1. – С. 50-85.
19. Ключников В.Д. Устойчивость упругопластических систем / В.Д. Ключников. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
20. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф / Р. Гилмор. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 320 с; Т. 2. – 350 с.

21. Арнольд В.И. Математические методы классической механики / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1974. – 213 с.
22. О повышении устойчивости горных выработок / В. Е. Забигайло, В.В. Репка, В.Н. Калиниченко, В.Б. Демченко // Изв. вузов. Горный журнал. – 1986. – № 1. – С. 25-27.
23. Шашенко А.Н. Механика горных пород: учебник / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко. – К.: Новий друк, 2003. – 400 с.
24. Глушко В.Т. Большие деформации горных выработок с учетом разрыхления пород в неупругой зоне / В.Т. Глушко, Н.П. Немчин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1967. – № 3. – С. 3-8.
25. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах / А. Лабасс // Вопросы теории горного давления: сб. науч. тр. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59-164.
26. Проведение и крепление горных выработок / В.В. Орлов, А.М. Янчур, М.С. Бабичев и др. – М.: Недра, 1965. – 494 с.
27. Ставрогин А.Н. Пластичность горных пород / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
28. Черняк И.Л. Влияние сопротивления крепи на устойчивость подготовительных выработок / И.Л. Черняк, В.Г. Ильюшенко, Е.Л. Звягильский // Уголь Украины. – 1990. – № 8. – С. 27-28.
29. Черняк И.Л. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт / И.Л. Черняк, Ю.И. Бурчаков. – М.: Недра, 1984. – 304 с.
30. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

31. Терещук Р.Н. Обоснование параметров анкерной крепи капитальных наклонных выработок в условиях шахт ГХК “Добропольеуголь”: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / Терещук Роман Николаевич. – Днепропетровск, 2002. – 162 с.
32. Заславский Ю.З. Крепление подземных сооружений / Ю.З. Заславский, В.М. Мостков. – М.: Недра, 1979. – 325 с.
33. Черняк И.Л. Метод распознавания устойчивости почвы горных выработок / И.Л. Черняк, Б.М. Наймарк // Вопросы горного дела. – М.: Недра. – 1967. – С. 324-332.
34. Исследование физико-механических свойств горных пород и проявлений горного давления в подготовительных выработках глубоких шахт Донбасса: реферативная информация / В.Т. Глушко, И.И. Ваганов, И.С. Кравцов, Б.С. Усатенко. – Киев: Наукова думка, 1969. – 72 с.
35. Солодянкин А.В. Обоснование параметров способа усиления крепи подготовительных выработок при несимметричной нагрузке: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / Солодянкин Александр Викторович. – Днепропетровск, 1996. – 243 с.
36. СНИП II-94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1982. – 272 с.
37. Ким Д.Н. Исследование структурного ослабления трещиноватых пород моделированием прочностных свойств в лабораторных условиях / Д.Н. Ким // Вопросы исследования горного давления и сдвижения пород. – Свердловск: УФ ИГД АН СССР, 1963. – Вып. 5. – С. 97-105.
38. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш; под ред. проф. д-ра техн. наук М.М. Протольяконова. – М.: Недра, 1969. – 388 с.

39. Чирков С.Е. Исследование влияния масштабного эффекта на прочность углей в условиях различных напряженных состояний: дис. ... канд. техн. наук / С.Е. Чирков. – М., 1965. – 184 с.
40. Blaha Frantisek. Prispovek k otazce korebace mezu pevnosti uhelneho vzorku a pevnosti uhelneho masivu // Sb. Ved. Pr. VSB Ostrave R. horn. geol / 1975. - N 21. – S. 63-79.
41. Костомаров Н.Е. Влияние прочности массива на размер зоны неупругих деформаций пород вокруг горной выработки / Н.Е. Костомаров // Горное давление и горные удары. – Л.: ВНИМИ, 1977. – № 103. – С. 67-70.
42. Фисенко Г.Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости / Г.Л. Фисенко // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. – С. 21-29.
43. Спивак А.И. Механика горных пород / А.И. Спивак, А.Н. Попов. – М.: Недра, 1957. – 200 с.
44. Шашенко А.Н. Способ оценки хрупкости горных пород / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко, Е.А. Сдвижкова // Сборник научных трудов НГА Украины. – Днепропетровск: РИК НГА Украины, 2001. – № 11, Т. 1. – С. 34-40.
45. Методы определения прочности глинистых пород / под ред. Г.К. Бондарика. – М.: Недра, 1974. – 216 с.
46. Литвинский Г.Г. Определение коэффициента бокового распора при различных реологических моделях породного массива / Г.Г. Литвинский, А.П. Коган // Вопросы теоретической и экспериментальной реологии горных пород. – К.: Наук. думка, 1974. – С. 40-48.

47. Христианович С.А. Исследование механизма гидравлического разрыва пласта / С.А. Христианович // Материалы по разработке нефтяных и газовых месторождений: сб статей / Ин-т геологии и разработки горючих ископаемых АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – Т. 2. – С. 21-26.
48. Батугин С.А. Напряженно-деформированное состояние нетронутого массива горных пород и его влияние на ведение горных работ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / С.А. Батугин. – Новосибирск, 1974. – 40с.
49. Гзовский М. В. Основы тектонофизики / М.В. Гзовский. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
50. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массиве горных пород) / под ред. П. Н. Кропоткина. – М.: Наука, 1973. – 186 с.
51. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов и др. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.
52. Булин Н. К. Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры / Н.К. Булин // Геотектоника. – 1971. – № 3. – С. 3-15.
53. Кропоткин П. Н. Напряженное состояние земной коры по измерениям в горных выработках и геофизическим данным / П.Н. Кропоткин // Проблемы теоретической и региональной тектоники. – М., 1971. – С. 238-253.
54. Влох Н.П. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород / Н.П. Влох, А.Д. Сашурин. – М.: Недра, 1970. – 123 с.
55. Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива / Г.А. Марков. – Л.: Наука, 1977. – 213 с.
56. Мякишев В.С. Обзор результатов натуральных измерений естественного напряженного состояния массива горных пород / В.С. Мякишев // Изв. вузов. Геология и геофизика. – 1985. – 37 с.

57. Борщ-Компаниец В.И. Механика горных пород, массивов и горное давление / В.И. Борщ-Компаниец. – М.: Изд-во МГИ, 1968. – 484 с.
58. Волошин Н.Е. Борьба с выбросами породы в шахте / Н.Е. Волошин, В.И. Тарасьев. – Донецк: Донбасс, 1968. – 64 с.
59. Зборщик М.П. Влияние аномальных зон силового поля в угленосном массиве на проявления горного давления при отработке пологих пластов на больших глубинах / М.П. Зборщик, В.И. Пилюгин, М.Б. Жмилюк // Материалы междунар. науч.-практ. Симпозиума «Современные проблемы шахтного и подземного строительства». – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – Вып. 6. – С. 28-35.
60. Зборщик М.П. Прогноз уровня природного силового поля во вмещающем массиве при отработке пликативно нарушенных пологих пластов / М.П. Зборщик, В.И. Пилюгин // Уголь Украины. – 2005. – № 9. – С. 7-10.
61. Разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости вентиляционного штрека 8 северной лавы уклона пласта  $m_5^{1B}$  горизонта 450 м шахты «Добропольская» при проведении его в присечку к 7 северному конвейерному штреку уклона пласта  $m_5^{1B}$  горизонта 450 м навстречу движущемуся очистному забою 7 северной лавы уклона пласта  $m_5^{1B}$  горизонта 450 м [Текст]: Звіт про НДР (закл.) 041015 / ДВНЗ «Національний гірничий університет»; керівн. О.О. Сдвижкова; викон.: О.М. Шашенко [та ін.]– Дніпропетровськ, 2013.– 107 с.
62. Hoek E. *Practical Rock Engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 2002. pp. 325.
63. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Універ. вид-во “Пульсари”, 2002. – 304 с.
64. Гапеев С.Н., Панченко В.В. Исследование изменения НДС породного массива при одном варианте взаимного влияния протяженных выработок // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – Вип. 36. – С. 38-42.

65. Александров А.Н., Крылов И.В., Выгодин М.А. Экспериментальные исследования проявления давления в выработках при тампонаже закрепного пространства твердеющими материалами//Сб. Совершенствование технологии подземных горных работ. Научные сообщения. Выпуск 243. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского – 1985. – С. 125-128.

66. Гетце В., Бушман Н., Шроер Д. Требования к вяжущим материалам, используемым для упрочнения пород, охраны и крепления горных выработок. // Глюкауф. – 1979. №24 – С. 23-26.

67. Выгодин М.А., Евтушенко В.В. Пучение пород почвы в выработках на шахтах Западного Донбасса.//Уголь Украины, 1987, №7 – С.12-13.

68. Король А.Ю. Закономерности деформирования приконтурного массива в окрестности одиночной выработки при вспучивании пород почвы / А.Ю. Король // Міжвідомчий збірник наукових праць «Геотехнічна механіка», 2014. - № 115: Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – С. 170-175.

69. Шевченко В.В., Тупиков Б.Т., Селезень А.Л. Влияние плотности крепи на смещения пород в подготовительных выработках // Уголь Украины. – 1998. – №10. – С. 13-15.

70. Усаченко Б.М. Комбинированные охранные системы нарастающего сопротивления – безальтернативная технология поддержания выемочных штреков / Б.М. Усаченко, В.Н. Трипольский, А.А. Яйцов, Е.Н. Халимендигов // Геотехническая механика. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 91. – С. 15-26.

71. Косков И.Г. Новые материалы и конструкции крепи горных выработок, - М.: Недра, - 1987. - 198 с.

72. Волов В.Т., Мельников Н.И. Перспективы применения фосфогипсовых вяжущих для поддержания горных выработок // Уголь. - 1984.-№ 11. - с. 24-26.



73. Зейферт В.П., Гэфенидер Э.А., Мальзам Е.Е, Тампонаж закрепного пространства при проведении горных выработок // Уголь. -1983. - 14 12. - с, 14-17.
74. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт/Э.Я.Кипко, Ю.А.Полозов и др. М.: Недра. - 1984. - 280 с.
75. Кошелев К.В., Петренко Ю.А., Новиков А.О. Охрана и ремонт горных выработок. – М.: Недра. 1990. – 218 с.
76. Рева С.Н. Механизация возведения комбинированных крепей // Задачи комплексной механизации и автоматизации производственных процессов при проведении горизонтальных и наклонных капитальных горных выработок М.: Изд. ЦБНТИ, 1976.
77. Рева С.Н., Максимов А.П. Опыт применения замкнутых и комбинированных крепей в условиях слабых и неустойчивых пород // Проведение и крепление горных выработок в условиях неустойчивых горных пород: Всесоюз. семинар. – Павлоград, 1976.
78. Максимов А.П., Рева С.Н. Эффективность применения комбинированных крепей в сложных горногеологических условиях // Применение новых видов крепей для капитальных выработок: Тез. докл. Всесоюз. семинаре, Междуреченск. – М., 1977.
79. Максимов А.П., Рева С.Н., Стрельцов Е.В. Опыт и перспективы применения комбинированных крепей, работающих с упрочненным породным контуром // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках: Сб. научн. тр./ АН СССР; Ин-т горного дела. - Новосибирск, 1977. – С. 150-152.
80. Максимов А.П., Евтушенко В.В. Тампонаж горных пород. – М.: Недра, 1978. – 180 с.
81. Рева С.Н., Жилин В.А. Возведение комбинированных крепей на шахтах-новостройках // Строительство предприятий угольной промышленности: Научно-техн. реферат. сб. / ЦНИЭИуголь. – 1978. - №1. – С.1-2.

82. Максимов А.П., Рева С.Н., Роечко А.Н. Комбинированная крепь с использованием несущей способности массива и опыт ее применения // Крепление, поддержка и охрана горных выработок: Сб. научн. тр. / АН СССР. Сибирское отд. Ин-т горного дела. - Новосибирск, 1979. – С. 35-40.

83. А.с. 823589. Устройство для возведения крепи из армированного набрызгбетона / С.Н. Рева В.Н. Рева, Л.К. Нейман, О.И. Мельников. – 1980.

84. Максимов А.П., Роечко А.Н., Шашенко А.Н. Напряженно-деформированное состояние крепей, работающих с использованием несущей способности приконтурного массива // Крепление и охрана горных выработок: Сб. научн. тр. / АН СССР; Ин-т горного дела. – Новосибирск, 1981. – С. 17-24.

85. Максимов А.П., Рева С.Н., Шашенко А.Н., Роечко А.Н. и др. Опыт применения композиционной крепи АНТ // Строительство предприятий угольной промышленности: Научно-техн. реферат. сб.- М., 1982. - №1. – С. 27-29.

86. Максимов А.П. Использование несущей способности пород в приконтурной зоне // Крепление, поддержание и охрана горных выработок: Сб. научн. тр. / АН СССР; Ин-т горного дела. – Новосибирск, 1983. – С. 5-7.

87. Максимов А.П., Шашенко А.Н., Роечко А.Н. Комбинированная крепь АНТ и методика определения основных ее параметров // Крепление, поддержание и охрана горных выработок: Сб. науч. тр. / АН СССР. – Новосибирск, 1983. – С. 52-54.

88. Роечко А.Н. Взаимодействие комбинированной крепи капитальной горной выработки с породным массивом и методика расчета крепи: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 1983. –195 с.

89. Александров А.Н., Крылов И.В., Выгодин М.А. Экспериментальные исследования проявлений горного давления в выработках при тампонаже закрепного пространства твердеющими материалами // Совершенствование технологии подземных горных работ: Научн. сообщения / Ин-т горного дела им. А.А.Скочинского. – М., 1985. – Вып. 243. – С. 125-128.

90. Выгодин М.А., Евтушенко В.В. Комплекс на поверхности шахты для тампонажа горных выработок // Шахтное строительство. – 1985. - №11. – С. 25.

91. Максимов А.П. Новые комбинированные крепи капитальных горных выработок с направленным использованием несущей способности приконтурного массива // Шахтное строительство. – 1985. - № 5. – С. 13-16.

92. Максимов А.П., Шашенко А.Н. Определение основных параметров комбинированной крепи капитальных выработок угольных шахт // Шахтное строительство. – 1985. - №1. – С. 8-10.

93. Максимов А.П., Шашенко А.Н., Дрышлюк А.А. Технологические параметры комбинированной крепи горизонтальных выработок // Крепление, поддержание и охрана горных выработок. – Новосибирск, 1985. – С. 3-8.

94. Александров А.Н. , Выгодин М.А.Евтушенко В.В. Уменьшение металлоемкости арочной крепи при тампонаже закрепного пространства // Вопросы проведения, крепления и поддержания горных выработок: Научн. сообщения / Ин-т горного дела им. А.А.Скочинского. – М., 1988. – С. 100-104.

95. Выгодин М.А., Евтушенко В.В. Методы повышения устойчивости горных выработок на шахтах Западного Донбасса // Шахтное строительство. – 1989. - №5. – С. 11-14.

96. Выгодин М.А., Евтушенко В.В. Устойчивость вмещающего массива пород и вопросы технологии сооружения горных выработок // Шахтное строительство. – 1989. - №8. – С. 4-8.

97. Шашенко А.Н., Рева С.Н., Каганов М.Е. и др. Механизация набрызгбетонных и тампонажных работ при креплении горных выработок // Новые технологии применяемые при строительстве шахт: Сб. науч. тр. / ЦНИИЭИуголь. – М., 1990. – С. 9-14.

98. Солодянкин А.В., Выгодин М.А., Смирнов А.В., Коробченко В.В., Прокудин А.З. Тампонаж закрепного пространства как эффективное средство создания системы «крепь-массив» // Форум гірників-2014: Матеріали міжнародної конференції 1-4 жовтня 2014 р. – Дніпропетровськ: РВК НГУ. – 2014. – С. 112-120.
99. Солодянкин А.В., Выгодин М.А., Коробченко В.В., Смирнов А.В., Прокудин А.З. Совершенствование технологии тампонажа закрепного пространства в сложных горно - геологических условиях шахт Западного Донбасса // Розробка родовищ. Д.: ТОВ «ЛізуновПрес», 2014. – С. 171-178.
100. Кириченко В.Я. Штрековые крепи проверенные временем и признанные шахтами // Уголь. – 2006 – №11. – С. 21-23.
101. Красников В.Д., Тенорков А.А. Научно-технический прогресс при подземной добыче угля. Критерии, направления, реализация, М.: Недра, 1991. - 140 с.
102. Гротовски У. Прогресс в управлении горным давлением//Глюкауф.- 1981.–№ 17. -с.35-38.
103. Айкхофф Ю. Техника и технология анкерного крепления в системе штрековой крепи // Глюкауф. – 2008. – № 2 (3). – С. 28-35.
104. Лангош У. Проектные основы управления горным давлением комбинированной крепью в пластовых штреках // Глюкауф. – 2002. – № 1. – С. 16-20.
105. Баймдик Ю., Штёттнер М.Т. Буровзрывная проходка пластовых штреков с анкерной крепью // Глюкауф. – 2008. – № 2 (3). – С. 18-27.
106. Давыдов С.С. Расчет и проектирование подземных конструкций / С.С. Давыдов. – М.: Изд-во АН СССР, 1938. – 386 с.
107. Шашенко А.Н., Солодянкин А.В., Мартовицкий А.В. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт. Монография. – Днепропетровск: ЛизуновПрес, 2012. – 384 с.