

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ**

**Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»**

**Факультет природничих наук і технологій**

Кафедра нафтогазової інженерії та буріння

# **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни  
**“ФІЗИКА ГІРСЬКИХ ПОРІД”**

для студентів напряму  
підготовки "Нафтогазова  
інженерія та технології "  
денної та заочної форм навчання

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ДРУКУ  
методичною комісією зі  
спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та  
технології» (протокол № 8 від 09.07.2024)

ДНІПРО – 2024

Конспект лекцій з дисципліни “Фізика гірських порід” для бакалавра спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / проф. Судаков А.К. Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка» – Д. : НТУ «ДП», 2024.– 150 с.

Упорядники:

А.К.Судаков, доктор технічних наук, професор кафедри техніки нафтогазової інженерії та буріння Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка»

©А.К.Судаков, 2024  
©НГУ, 2024

## ЗМІСТ

Тема 1. Лекція 1.	Вступ до дисципліни.....	7
	Будова Землі.....	7
	Породи і мінерали.....	8
	Кругообіг гірських порід.....	11
	Гороутворення.....	14
	Дрейф континентів.....	16
Тема 2. Лекція 2.	Основні поняття та визначення.....	17
	Коротка історія розвитку механіки гірських порід.....	18
	Основні поняття та визначення.....	19
	Моделі в механіці гірських порід.....	20
Тема 3. Лекція 3.	Механічні властивості гірських порід та масивів.....	22
	Генезис, склад і будова гірських порід.....	22
	Тріщинуватість породних масивів.....	25
	Класифікація гірських порід.....	27
Лекція 4.	Пружність, крихкість і пластичність гірських порід.....	31
	Деформаційні та міцнісні характеристики гірських порід.....	32
Лекція 5.	Деформування і руйнування гірських порід за межею міцності.....	36
	Масштабний ефект в гірських породах.....	39
	Реологічні властивості гірських порід.....	40
Лекція 6.	Поняття про теорію спадкової повзучості..	43
	Визначення механічних властивостей гірських порід у натурних умовах.....	46
	Статична обробка результатів вимірювань.	48
Тема 4. Лекція 7.	Напружений стан гірських порід та основні співвідношення механіки суцільно деформованого тіла.....	50
	Елементарний об'єм породного масиву.....	50
	Напружений стан гірських порід.....	53
	Види напруженого стану.....	56
	Граничні умови рівноваги.....	57
Тема 5. Лекція 8.	Міцність гірських порід в складному на-	

	пруженому стані.....	58
	Розвиток уявлень про міцність і руйнування твердих тіл.....	58
	Випробування гірських порід у складному напруженому стані.....	61
	Теорія руйнування гірських порід у складному напруженому стані.....	64
Тема 6. Лекція 9.	Напружено-деформований стан породних масивів.....	69
	Початковий напружений стан зв'язних породних масивів.....	69
	Початковий напружений стан сипучих породних масивів.....	70
	Характерні особливості прояву гірського тиску та задачі управління ним в очисних виробках.....	72
	Прояви гірського тиску в очисних виробках при різних системах розробки вугільних і рудних родовищ.....	73
	Напружено-деформований стан порід навколо очисної виробки. Зони опорного тиску і розвантаження.....	75
Тема 7. Лекція 10.	Визначення навантаження на кріплення горизонтальних виробок.....	76
	Гіпотеза зводу природної рівноваги.....	77
	Гіпотеза взаємодії кріплення і породного масиву.....	80
	Гіпотеза зводуутворення в умовах взаємодії кріплення з породним контуром.....	82
Тема 8. Лекція 11.	Визначення навантаження на кріплення....	84
	Методи розподілення навантаження на кріплення ствола, основані на теорії розрахунку породних стін.....	84
	Методи, основані на гіпотезі спільного деформування системи «кріплення ствола-порода».....	87
	Емпіричні методи визначення навантаження на кріплення стволів.....	89

Тема 9. Лекція 12. Вздуття порід ґрунту підземних виробок...	90
Тиск на кріплення зі сторони ґрунту виробки.....	91
Реологічні методи оцінки видавлювання порід ґрунту у виробках.....	93
Пружно-пластична стійкість породного масиву в межах одиночної виробки.....	94
Емпіричні методи прогнозу вздуття порід ґрунту.....	96
Тема 10. Лекція 13. Динамічний прояв гірського тиску.....	99
Раптові викиди вугілля і газу в підземних виробках.....	99
Фізичні і структурні особливості системи «вугілля-метан».....	101
Теорії газодинамічних явищ.....	102
Способи запобігання і методи прогнозу газодинамічних явищ.....	104
Тема 11. Лекція 14. Стійкість ціликів та потолочин камер.....	106
Загальні уявлення.....	106
Взаємодія ціликів і камер з породним масивом.....	108
Розрахунок допустимої ширини міжкамерних ціликів.....	110
Метод розрахунок міжкамерних ціликів систем розробки методом свердловинного гідровидобутку.....	113
Тема 12. Лекція 15. Стійкість уступів і бортів кар'єрів.....	116
Форми прояву зрушення порід при відкритій розробці.....	117
Основні положення методів розрахунку стійких відкосів і бортів кар'єрів.....	119
Методи розрахунку відкосів, основані на гіпотезі плоскої поверхні зсування.....	120
Методи розрахунку відкосів, засновані на гіпотезі криволінійної поверхні здвигання.....	122
Протизсувні заходи на кар'єрах.....	125
Тема 13. Лекція 16. Динамічні явища в масивах порід під впливом розробки.....	128

	Гірські удари.....	128
	Класифікація гірських ударів.....	129
	Прогноз і реєстрація гірських ударів.....	131
	Основні поняття про раптові викиди порід та газу.....	134
	Умови виникнення раптових викидів і уявлення про їх механізм.....	136
	Оцінка викидонебезпечності гірських порід і прогноз раптових викидів.....	137
Тема 14. Лекція 17.	Способи попередження і боротьби з небезпечними динамічними проявами гірського тиску в шахтах.....	138
	Загальні положення.....	138
	Захист людей від гірських ударів і раптових викидів.....	138
	Виймання ціликів, небезпечних по гірським ударам.....	140
	Використання потенціальної енергії пружних деформацій масиву в процесі крихкого руйнування корисного компонента при видобутку.....	141
Додатки .....		145
Додаток А.	Знання та навички, які повинен отримати студент при вивченні курсу «Механіка гірських порід».....	145
Додаток Б.	Теми рефератів.....	145
Додаток В.	Перелік питань для рубіжного контролю...	146
	Список рекомендованої літератури.....	150

## Тема 1. Лекція 1. ВСТУП ДО ДИСЦИПЛІНИ

Історія географічних відкриттів веде свій відлік з тих далеких часів, коли люди створили засоби пересування, передусім по воді, і почали підкоряти нові землі. Вирушати в путь їх спонукало прагнення знайти кращі землі, потреба в розширенні торгівлі, жага збагачення і вічний потяг до пізнання невідомого. Але справжня епоха Великих географічних відкриттів настала в XV ст., коли європейські мореплавці перетнули океани і виявили далекі континенти. Відтоді освоєння світу велося дедалі інтенсивніше.

### Будова Землі

Тіло планети складається з ряду шарів, що сформувалися на ранніх стадіях її розвитку. Це, зокрема, ядро, мантія і земна кора (рис.1).

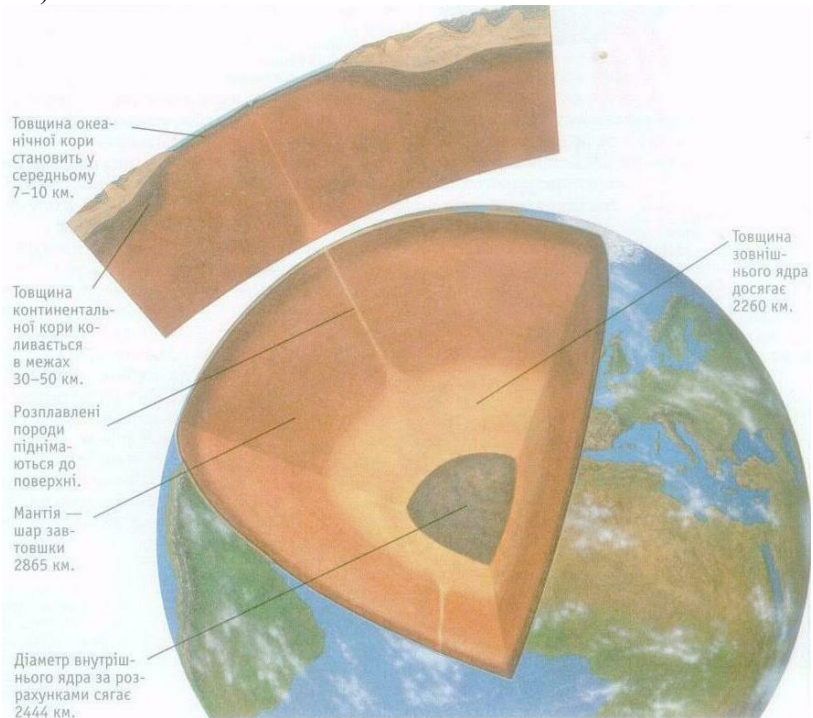


Рис. 1. Будова Землі

У середині Землі міститься щільне ядро, що складається із заліза,

нікелю і незначної кількості інших елементів. У ядрі виділяються внутрішня і зовнішня його частини. Зовнішнє ядро знаходиться в рідкому або розплавленому стані при температурі близько 4 000 °С. Температура у внутрішньому ядрі досягає 10 000 °С, і вважається, що субстанція там знаходиться, або поводить як тверда речовина, через дію гігантського тиску. За оцінками вчених тиск у центральній частині досягає 3 млн. атмосфер. Разом на внутрішнє і зовнішнє ядро припадає 32% всієї маси планети. Над зовнішнім ядром розміщена мантія – шар, що становить 66% всієї маси Землі. Породи там перебувають переважно в твердому стані при температурі понад 1300 °С.

Верхній шар – земна кора – «дрейфує» по поверхні мантії: він значно тонший за інші. Виділяють три типи земної кори: континентальна, що залягає під континентами (завтовшки 30...50 км; місцями тоншає до 20 км, а під молодими горами потовщується до 70...80 км); земна кора перехідного типу (завтовшки 15...30 км) й океанічна, що залягає під океанами (найтонша, в середньому 7...10 км).

Шари Землі залягають один над одним. Найважчий шар – ядро, розміщене в центральній частині, а найлегший – земна кора, що знаходиться на поверхні. На частку земної кори припадає всього 0,5% усієї маси планети. Складається вона з крихких гірських порід і може розтріскуватися при землетрусі.

### **Породи і мінерали**

Гірські породи – природні сполуки одного або кількох мінералів. За умовами утворення вони діляться на три групи: магматичні, метаморфічні й осадові.

Гірські породи – природні сполуки одного або кількох мінералів, природних тіл, однорідних за хімічним складом і фізичними властивостями.

Мінерали, яких налічується кілька тисяч, можуть (як золото і мідь) складатися з одного елемента або бути (як силікати) сполуками кількох хімічних елементів.

*Магматичні породи.* Магматичні породи утворюються в результаті затвердіння магми. Тип магматичної породи визначається хімічним складом початкової магми та швидкістю її остигання і твердіння. Багато магматичних порід, зокрема граніт, сформувалося



при застиганні магми в товщі земної кори.

Такі породи застигають повільно і в результаті стають крупнокристалічними. Інші магматичні породи, як базальт і обсидіан, утворюються при виливанні магми на денну поверхню і швидкому її затвердінні. Швидке охолодження не дає можливості цим породам повністю викристалізуватися і надає їм тонкозернистого або склуватого вигляду.



Рис. 2 Стовпи базальтової породи

них розчинів.

Процес метаморфізму протікає в двох основних напрямках. Розжарені магматичні породи можуть проникати в товщу інших порід і за рахунок теплової та хімічної дії змінювати геологічне середовище, що їх містить. Наприклад, вапняк під дією високих температур перетворюється на мармур. Так само пісковик, осадова порода, трансформується в метаморфічну породу – кварцит.

Другий вид метаморфізму проявляється на великих просторах і пов'язаний з величезним тиском, що виникає в процесі складкоутворення й ортогенезу. Такі породи, як сланці й аргіліти, під впливом високого тиску можуть перетворитися на гнейси.

На рис. 3 зображено, як теплова дія магматичної інтрузії перетворила вміщуючі пласти вапняку на мармур (справа). Тиск, що виникає у процесі складкоутворення (зліва), може перетворити глини й аргіліти на глинисті сланці.

На рис. 2 зображена вивержена з вулканічного жерла базальтова лава яка при остиганні стискається і тріскається, утворюючи призматичні стовпи. «Частокіл Диявола» в горах Сьєрра-Невада (США) представлений чотири- і семигранними базальтовими стовпами.

#### *Метаморфічні породи.*

Метаморфічні гірські породи – породи, що утворилися в результаті перетворення осадових і магматичних порід у земній корі та мантії під впливом високої температури, тиску і хімічно актив-



Рис. 3. Геотермальні зміни корисних копалин

*Осадові породи.* Хоча осадові породи складають незначну частину земної кори, ними представлені три чверті всіх поверхневих утворень. Осадкові породи ділять на біогенні, хемогенні і теригенні.

Біогенні породи складаються зі скелетних решток відмерлих організмів, які, поступово ущільнившись, утворили таку породу, як Крейда.

Хемогенні породи, як-от гіпс, утворюються при відкладенні на дні водойми за рахунок випаровування і зміни температури води.

А в осадових породах можна часто побачити чітку шаруватість. Такими породами складена частина Долини Смерті в Каліфорнії (США).

Теригенні породи, що становлять 75% усіх осадових порід, складаються з уламків різних порід і утворюються при денудаційних процесах.

До них відноситься дія води, вітру, льоду і низьких температур, а також хімічні зміни і робота кореневої системи рослин. Зруйнований матеріал внаслідок дії гравітації, вітру, води і льоду переноситься і відкладається у вигляді шару. У міру того, як над цим шаром накопичуються нові осади, він під дією тиску ущільнюється. Врешті-решт крихкі частинки цементуються, утворюючи щільну осадову породу, схожу на пісковик.

*Коштовне каміння та руди.* Безцінні й красиво забарвлені мінерали з яскравим блиском, прозорістю, твердістю, здатністю розрізатися і поліруватися, називаються дорогоцінним камінням. Особливо цінні серед них – алмаз, сапфір і рубін. Маса коштовного каміння вимірюється в каратах. Один карат дорівнює 0,2 г. Найзнаменитішим каменям, зокрема алмазам, надають іще й власні

назви. Так, найкрупніший у світі алмаз масою 3106 карат, був названий «Куллінаном». У результаті невдалих спроб огранення з «Куллінана» було виготовлено 9 великих і 96 менших діамантів. Маса найбільшого з них – «Великої Зорі Африки» – становить 530 карат. Другий за величиною діамант – «Мала Зоря Африки» – масою 317 карат – нині прикрашає корону Британської імперії. Природні сполуки, що містять метали в такій кількості та вигляді, при яких їх видобуток стає рентабельним, називаються рудами. Наприклад, основною алюмінієвою рудою є боксити, а мідною – малахіт. Руди видобуваються, а цінні компоненти відділяють з них шляхом спеціальної обробки.

Мінерали найчастіше утворюються в надрах Землі, де високі температура і тиск трансформують одну породу в іншу рис. 4. Мінерали можуть, крім того, утворюватися при випаровуванні й охолодженні води, а також розплавів.

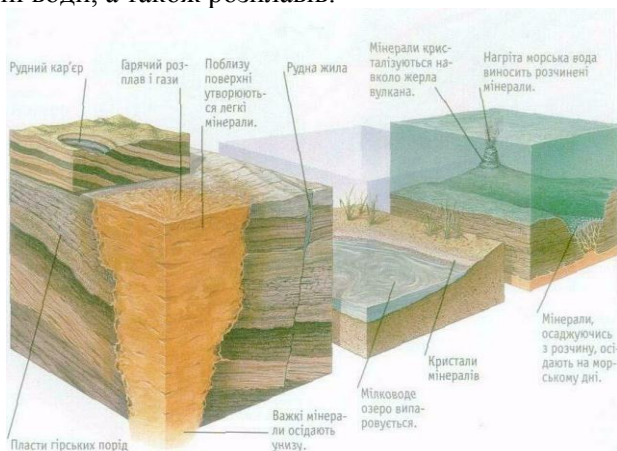


Рис. 4. Процес утворення мінералів

### Кругообіг гірських порід

Кругообіг гірських порід – один зі способів схематизації переходу гірських порід від одного типу до іншого (рис. 5). Вчені використовують з цією метою геохронологію.

Гірські породи постійно змінюються. Вміщуючи їх мінерали постійно переміщуються під впливом навколишнього середовища. Мантія і земна кора при цьому відіграють роль замкнутої системи. Гірські породи переносяться і перетворюються з одного, типу в

інший. Кругообіг гірських порід вказує на зв'язок між магматичними, метаморфічними й осадовими породами, а також способи їх утворення і переробки.



Рис. 5. Схема процесів, що відбуваються при переробці та переході порід з одного типу в інший

Поняття про кругообіг порід введено шотландським геологом Джеймсом Хеттоном (1726-1797 рр.). Процес починається з охолодження магми й утворення магматичних порід. Денудаційні процеси руйнують ці утворення, а частинки порід, перенесені водами, вітром або льодом відкладаються деінде у вигляді осадів.

Потім осадиди під масою вище розміщених відкладень ущільнюються, цементуються й утворюють осадові породи.

Осадові породи, що сформувалися за невисоких тиску і температур, найбільш сприйнятливі, із зростанням тиску і температур,

до подальших змін. Відкладення, що залягають на великих глибинах або залучені в процес горотворення, часто перетворюються на метаморфічні утворення.

І ще більша температура необхідна для переходу метаморфічних порід у розплавлений стан, магму, з якої утворюються магматичні породи.

Кругообіг – не завжди послідовна зміна по ланцюжку: магматичні, осадові, метаморфічні породи. Наприклад, метаморфічні породи можуть, зазнавши ерозії, перевідкладатись у формі осадових порід, а осадові породи, при нагріванні до екстремальних температур, здатні перейти в розплав і при охолодженні утворити нові магматичні породи. Всі три типи гірських порід до того ж можуть руйнуватись і перевідкладатись у формі нових осадових утворень.

**Скам'янілості.** Скам'янілості – рештки відмерлих рослин і тварин, похованих у розсипчастих осадових породах, що ущільнювалися протягом мільйонів років. Скам'яніли лише тверді частини

тіл живих організмів, зокрема кістки, зуби і мушлі. Тому знаходження решток м'якотілих істот – велика рідкість. Систематизація окам'янілостей надала цінну інформацію про життя на Землі впродовж мільйонів років. Оскільки вивчення викопних решток



Рис. 6. Геохронологічна шкала

показує, що схожі форми життя існували на Землі в один і той самий час, то така систематизація дозволяє використовувати її як метод датування віку гірських порід, названий методом керівних викопних організмів. Крім того, існує ще ряд методів визначення віку порід. Один із них – радіометричний метод – ґрунтується на тому, що швидкість радіоактивного розпаду деяких елементів і перетворення їх на стабільні ізотопи є сталою.

#### Геохронологічна шкала.

Сучасні вчені оцінюють вік Землі приблизно в 4,6 млрд. років. Геохронологічна шкала є одним зі способів конкретизації віку цього величезного проміжку часу. Шкала поділяється на чотири ери, що охоплюють усю понад 4-мільярдну історію Землі. Докембрійська ера, частка якої в часі існування планети становить 80%, є найбіднішою щодо викопних знахідок етапом її розвитку. На початку палеозойської ери на суші з'явилися перші рослини, а пізніше – і перші ліси, відмирання і поховання яких призвело до утворення найбільших родовищ кам'яного вугілля. У мезозойську

еру на Землі з'явилися, а потім і вимерли динозаври.

Геохронологічна шкала (рис. 6) поділяється на чотири ери (права колонка), три з яких розбиті на періоди. Кожен період охарактеризований певними викопними видами.

### Гороутворення

Протягом мільйонів років гори, завдяки рухам земної кори, вивітрюванню та вулканізму, зароджувалися, піднімалися і зникали з лиця Землі.

Гори – ділянки суші, що різко піднімаються над навколишньою територією – формуються здебільшого за рахунок руху земної кори. Тверді гірські породи, що складають земну кору, під впливом високого тиску можуть змінатись у складки.

Складки перекидаються, «пірнають» і наповзають одна на одну ніби зібгана ковдра. Гори можуть бути утворені цілою серією складок, що громадаються одна на одній. Пласти гірських порід під дією колосальних навантажень можуть розриватися, утворюючи тріщини та розлами. Блоки порід, обмежені розламами, здатні підніматися або опускатися, утворюючи брилові гори з крутими схилами і глибокі та протяжні рифові долини.

*Зіткнення плит.* Дрейф континентів призводить до зіткнення літосферних плит. Земна кора по їх краях деформується, утворюючи розлами і складки. Контактуючі ділянки суші здіймаються, утворюючи гірські пасма. Найбільш вражаючий приклад різноспрямованого руху плит і утворення гір можна спостерігати в Гімалаях.

На рис. 7 зображено, як багато років тому літосферна плита, на якій розміщена сучасна Індія, зіткнулася з Євразійською плитою (зліва). Відкладення океанічного дна, затиснені між двох плит, були видавлені вгору, утворивши Гімалаї.

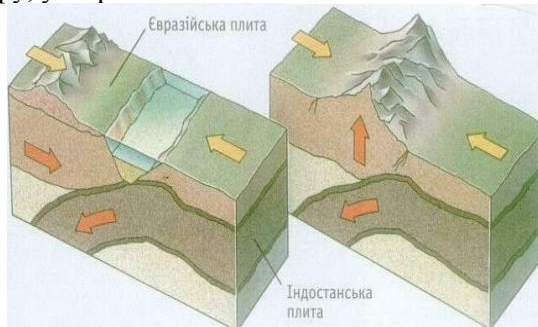


Рис. 7. Євразійська та Індонезійська

Понад 60 млн. років тому Індостанська плита почала рухатися на північ, скорочуючи водний простір океану Тетис. Рух тривав близько 45 млн. років і океанічна кора, що виявилася наче в гігантських лещатах, видавлювалася в різні сторони. З часом океан еніс зник, залишивши про себе спогад у вигляді високого гірського хребта, складеного породами його ложа.

*Виверження та ерозія.* Деякі гори утворюються не тільки за рахунок руху літосферних плит. При виверженні вулканів можуть формуватися конусоподібні, з крутими схилами гори, зокрема такі, як італійський Везувій, американська Сент-Хеленс і японська Фудзіяма.

Щитовидні вулкани з плоскішою поверхнею дали життя гавайським вершинам Мауна-Лоа і Мауна-Кеа.

Моноантиклінальні гори утворюються при проникненні магматичних порід у земну кору і підніманні вище розміщених пластів у вигляді куполоподібних підняттяв. Прикладом таких гір є гори Блек-Хіллс, що простяглися по американських штатах Північна Дакота і Вайомінг.

Гори можуть утворюватися не тільки за рахунок підняття суші, а й у процесі ерозійного розчленування платоподібних поверхонь і винесення слабких порід. Так сформувалося плато Озарк в американських штатах Арканзас і Міссурі.

Іноді гори формуються як за рахунок вулканізму, так і ерозії. Масив інтрузивних порід може бути експонований ерозійними процесами, вишищуючись як гори над доквіллям. Гранітні гори Керн-Горм у Шотландії – типовий приклад.

*Підняття і опускання.* Гори – не завжди довговічні утворення. Впродовж мільйонів років вони безперервно виникають, ростуть і руйнуються.

Руйнівна дія води, вітру і льоду знижує висоту гір, а річки і льодовики переносять і перевідкладають зруйнований матеріал. У результаті старі гори руйнуються, тоді як десь починають рости молоді гори.

До молодих гірських систем світу належать зокрема Альпи й наші Карпати та Кримські гори. До старих гір належать Уральські гори в Російській Федерації.

Брилові гори утворюються диференційованим рухом окремих брил земної кори вгору і вниз по тріщинах або розламах. Ці гори

розташовані вздовж лінійного розламу Моаб в американському штаті.

### Дрейф континентів

Континенти постійно рухаються, повільно переміщуючись разом із дрейфуючими блоками земної кори. Цей процес називається дрейфом континентів.

Земна кора – не єдине ціле, а система блоків, що повільно переміщуються по поверхні планети. Ці блоки, названі літосферними плитами, переміщуються конвективними течіями в мантії. Ці течії створює витікаючи з ядра Землі тепло. Здіймаючись і опускаючись, мантіїні потоки змушують також рухатись і плити.

#### Гіпотеза і докази

Геологів і любителів-палеонтологів спантеличило те, як одні й ті самі формації порід і викопні рештки могли знаходитися в місцях, віддалених одне від одного на тисячі кілометрів. У 1912 р. німецький дослідник Альфред Вегенер висунув гіпотезу дрейфуючих континентів (рис. 8, 9, 10). Він стверджував, що відомі нам сьогодні континенти з'явилися близько 100 млн. років тому в результаті розпаду єдиного надконтиненту Пангея. Ідея Вегенера не мала широкого визнання аж до 1960-х рр. Лише поява прогресивних технологій, зокрема систем лазерного вимірювання і космозйомки, підтвердили його гіпотезу. Континенти постійно переміщуються зі швидкістю від 1 до 10 см на рік. За мільйони років дрейф континентів сформував сучасні обриси материків і багато характерних особливостей.



Рис. 8. Близько 200 млн. років тому вся суша була єдиним надконтинентом, названим Пангея



Рис. 9. Близько 100 млн. років тому Пангея розпалася на материки. Африку та Південну Америку





Рис. 10. Сучасні континенти. Дрейф континентів продовжується так, що через 50 млн. років Північна Америка відділиться від Південної і приєднається до Євразійського континенту.

*Тектоніка плит.* Тектоніка плит – наука, що вивчає походження плит, їх рух і вплив на географію планети. З часом плити розходяться в різні сторони, проковзуючи одна відносно одної або енергійно наштовхуються одна на одну. Межі між плитами називаються розламами або зонами розламів. Саме вздовж цих ослаблених зон відбуваються землетруси і виверження вулканів.

Усього на земній кулі є сім великих і дев'ять менших плит. На карті рис. 11. показано положення семи великих літосферних плит: Євразійської, Африканської, Антарктичної, Південноамериканської, Північноамериканської, Тихоокеанської та Індо-Австралійської. Стрілками позначено напрям руху плит.

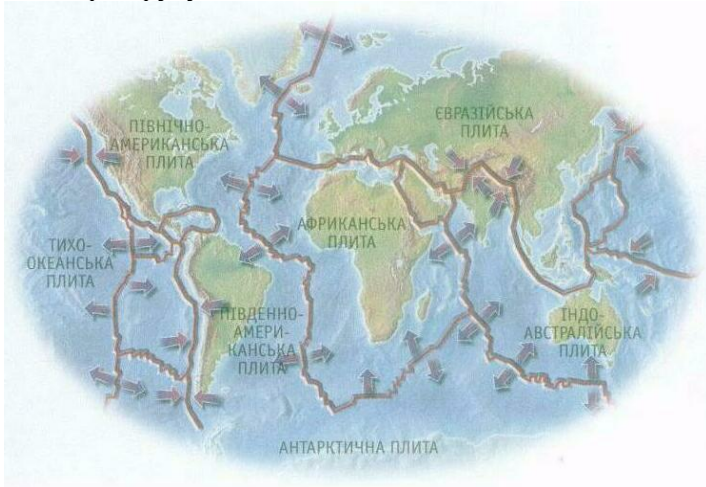


Рис. 11. Карта положення літосферних плит

## ТЕМА 2. ЛЕКЦІЯ 2. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Даний час характеризується бурхливим розвитком промислового виробництва, направлено на задоволення різних потреб суспільства. Його основою, перш за все, є сировина, яка значною мірою

видобувається з надр землі. Збільшення екологічних, енергетичних, транспортних та демографічних проблем також диктує збільшення середовища життя людини за рахунок використання підземного простору.

Надійність та довговічність функціонування підземних об'єктів значною мірою залежить від розуміння тих механічних процесів, які розвиваються у високо напруженому породному масиві. Закономірності поведінки породного масиву в місцях підземних виробок вивчає прикладна наука – механіка гірських порід чи геомеханіка.

Механіка гірських порід виникла на основі таких наук як механіка середовища, фізика твердого тіла, вища математика, теорія ймовірності, геологія, теорія підземного будування.

Основною метою вивчення дисципліни «Механіка гірських порід» є отримання знань, які дозволять в конкретних гірничо-геологічних умовах, спираючись на вихідні дані геологічної розвідки, оцінити геомеханічну ситуацію, а також параметри систем розробки при підземних чи відкритих гірських роботах, що дозволить ефективно видобувати корисний компонент.

### **Історія розвитку механіки гірських порід**

Історія розвитку механіки гірських порід охоплює порівняно невеликий період від початку минулого століття до сьогодення. В 1907 році була опублікована монографія «Давление горных пород на рудничную крепь», яка була першою теоретичною роботою з механіки гірських порід. У ній розглянуто гіпотезу утворення зведення природної рівноваги над гірськими виробітками і виконаний розрахунок кріплень для шахт неглибокого закладання.

У 1911 році з'являються праці Т. Кармана з вивчення поведінки гірських порід за умов усестороннього стиснення, в яких він перевіряє правильність посилення теорії міцності О. Мора.

У 1920-1950 роках опубліковані праці О.Ф. Графа, М.І. Койфмана, В.Д. Слесарева, П.М. Цимбаревича та інших авторів, присвячених питанням визначення величини тиску гірських порід на кріплення, вивчення фізико-механічних властивостей гірських порід та масивів, стійкості гірських виробіток. Дослідження цього періоду ґрунтуються, в основному, на простих моделях середовища та об'єктах, що вивчаються.

Пізніше були опубліковані фундаментальні праці в області гірсь-

кого тиску, які базуються на положеннях теорії пружності, пластичності та повзучості (В.В. Виноградов, Б.А. Картозія, А.Н. Шашенко, Е.І. Шем'якін), а також праці, в яких породний масив розглядався на основі статистичних моделей (А.Н. Шашенко, В.І. Шейнін та ін.)

До цього часу в механіці гірських порід сформувався самостійний напрямок, пов'язаний з дослідженням газодинамічних проявів гірського тиску (Л.Н. Биков, Е.І. Шем'якін та ін.).

Великий комплекс робіт з дослідження проявів гірського тиску в натурних умовах був виконаний науковими колективами під керівництвом А.Н. Зоріна, Г.А. Крупеннікова, І.Л. Черняка та ін.

Одночасно проводились лабораторні дослідження по моделюванню геомеханічних процесів і по вивченню фізико-механічних властивостей гірських порід (В.В. Виноградов, Ю.М. Карташов, В.В. Ржевський, К.В. Руппенейт, Б.М. Усаленко, та ін.).

З розвитком обчислювальної техніки велике значення в механіці гірських порід отримали численні методи дослідження складних фізичних моделей.

У даний час методи механіки гірських порід являються основою для створення глобальних комп'ютерних систем геомеханічного моніторингу породного масиву в місцях виробки, за допомогою яких здійснюється ефективно і безпечно освоєння підземного простору.

### **Основні поняття та визначення**

Механіка підземних споруд оперує деякими базовими поняттями та визначеннями, які сформувалися в процесі її розвитку.

Гірські породи – це мінеральні агрегати більш-менш постійного складу, які утворилися в результаті геологічних процесів. Гірські породи утворюють кору Землі. Верхня частина земної кори в якій відбуваються процеси вивітрювання та ґрунтоутворення представлена особливими породами, які називаються ґрунтами.

Літологічний різновид – це частина земної кори, складена гірською породою одного найменування. Невеликий об'єм гірської породи, відібраний з літологічного різновиду з метою визначення її властивостей, називається породним зразком.

Створення штучних порожнин під землею викликає місцеву чи локальну зміну напружено-деформованого стану в гірських породах. Та частина земної кори, в межах якої локалізуються механічні

процеси, викликані гірничими роботами, називається породним масивом.

Механічні якості гірських порід – це клас фізичних властивостей, який характеризує поведінку порід при різних силових впливах.

Механічні властивості гірських порід поділяються на:

- деформаційні, які характеризують здатність порід деформуватись під навантаженням;
- міцнісні, які характеризують опір порід різним силовим впливам;
- реологічні, які характеризують зміну міцнісних і деформаційних властивостей в часі.

Геомеханічні процеси – це механічні процеси, які розвиваються навколо гірських виробок як наслідок їх проведення, які стабілізуються чи не стабілізуються в часі. Геомеханічні процеси часто називають гірським тиском, який слід розуміти як сукупність сил які діють в породному масиві. Природа цих сил різна: гравітація, геотектоніка, гідростатика, тиск газу і т.п.

Прояв геомеханічних процесів, чи гірничого тиску, – це візуально чи інструментально простеженні у виробітках чи породному масиві реалізації внутрішніх сил у вигляді гірських ударів, викидів, підняття ґрунту, зміщення контуру виробок і т.п.

Під механічним станом породного масиву розуміють сукупність деформаційних, міцнісних, геологічних, акустичних і гідрогеологічних параметрів, які характеризують його поведінку при проведенні і експлуатації гірничих виробок.

### **Моделі в механіці гірських порід**

Основна мета геомеханіки полягає в прогнозуванні поведінки породного масиву при створенні в ньому штучних порожнин. Інженеру ще на стадії проектування гірничо видобувного підприємства необхідно знати яким буде навантаження на кріплення гірничих виробок, яка ймовірність газодинамічних проявів тиску, чи будуть стійкими ґрунт виробки, борти кар'єрів та відкоси відвалів та про багато інших геомеханічних показниках, які дозволили б в подальшому безпечно і економічно освоювати земні надра. Дослідники отримують ці знання на основі побудови, математичного опису і аналізу відповідних геомеханічних моделей.

Моделювання лежить в основі людської діяльності. Чим вищий рівень знань про оточуючий нас світ, тим більше моделі відповідають дійсності. Так І.І. Блехман, А.Д. Мішкіс та Я.Г. Пановко дають таке визначення моделі: «об'єкт  $M$  є моделлю об'єкта  $A$  відносно деякої системи  $S$  характеристик (якостей), якщо  $M$  будується (чи вибирається) для імітації  $A$  за цими характеристиками». При цьому під об'єктом  $A$  розуміють любе матеріальне тіло, дію, ситуацію.

Модель може бути дослідницькою, для вивчення вказаних характеристик чи робочою, для безпосереднього використання. В геомеханіці розглядають тільки дослідницькі моделі.

Процес розв'язку задач в геомеханіці складається, як правило, з декількох основних етапів (рис 1).

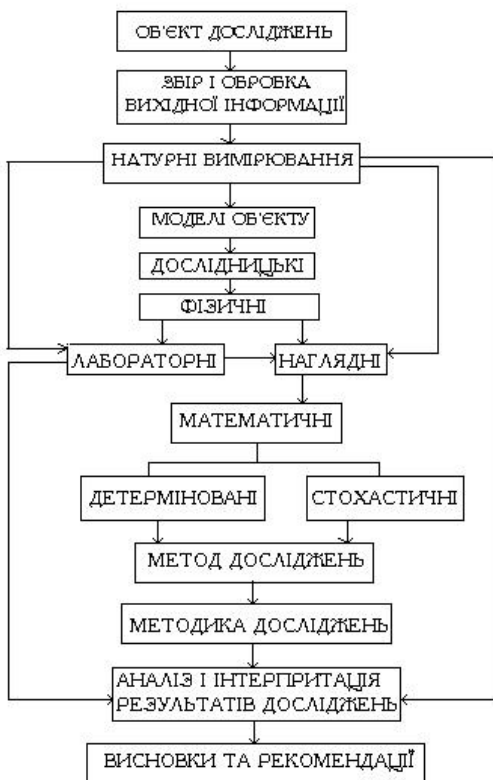


Рис 1. Структурна схема досліджень в геомеханіці

Спочатку формулюється загальна задача і визначається кінцева мета досліджень. Наступний, дуже важливий, етап досліджень полягає у вивченні об'єкту досліджень в натурних умовах. Для цього збирають геологічні, гідрогеологічні і гірничотехнічні характеристики тієї ділянки породного масиву, в якій буде здійснена виробка. Зібрані дані є основою для проведення лабораторних дослідів на моделях, що фізично реалізуються.

Дані фізичного моделювання в сукупності з результатами натурних вимірювань являються тим вихідним матеріалом за допомогою якого створюються так названі наглядні фізичні моделі.

Такими є, наприклад, ідеальний шарнір в будівельній механіці, суцільне пружне середовище в теорії пружності і т.п.

На основі наочної фізичної моделі створюється математична модель. Якщо вибрана математична модель, то ступінь оптимальності її побудови визначається рівнем адекватності та числом незалежних змінних, керуючих параметрів.

Після того, як визначено математичну модель, вибирається метод досліджень, на основі якого буде здійснено реалізацію цієї моделі.

Після того, як на основі вибраного методу розв'язана математична модель, перевіряється її адекватність реальному об'єкту шляхом порівняння отриманих результатів з натурними та лабораторними вимірюваннями. Якщо співпадання близьке, то поставлена задача розв'язана і можна перейти до обмірковування цих результатів, формулювання висновків і визначення напрямків подальшого застосування встановлених закономірностей.

### **Тема 3. Лекція 3. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ТА МАСИВІВ**

#### **Генезис, склад і будова гірських порід**

За походженням гірські породи поділяються на магматичні, осадові та метаморфічні.

Магматичні породи утворились в результаті охолодження та затвердіння магми. В залежності від місця її затвердіння розрізняють інтрузивні (граніт, діорит, габбро) та ефузивні (діабаз, андезит, базальт) гірські породи.

Осадові породи (глини, аргіліти, алевроліти) утворились при осіданні, накопиченні у водному чи повітряному середовищі про-

дуктів фізичного чи хімічного руйнування (вивітрювання) вихідних порід з подальшим потовщенням.

Частина осадових порід, яка сформувалася в одних і тих самих геологічних умовах називається фацією.

Метаморфічними називають гірські породи іноді магматичного, але переважно, осадового генезису, які після утворення в глибинах земної кори піддалися впливу високого тиску, температури, мінералізованих розчинів та газів. Це різного роду кварцити, мармур, кристалічні сланці.

Гірські породи складаються із зерен, кристалів, обломків різних мінералів, цементу та пор.

У залежності від генезису гірські породи за розмірами, умовами розміщення в просторі складових елементів поділяються на кристалічні (сінь, гіпс, вапняк, крейда), аморфні (обсидіан) та уламкові.

З походженням пор тісно пов'язані їх петрографічні характеристики: структура (будова) і текстура (склад).

Під структурою в даному випадку розуміють особливості внутрішньої будови гірської породи, обумовлені величиною і формою складових елементів, ступенем їх кристалізації, а також характером зв'язку між частинками.

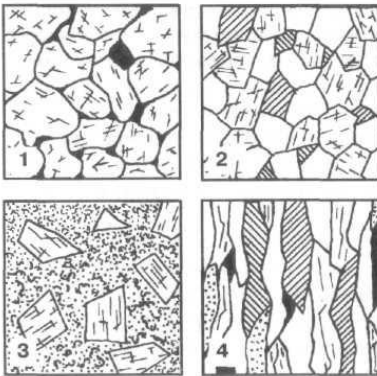


Рис. 1. Різні типи кристалічних структур: 1 – рівномірнoзерниста; 2 – різнозерниста; 3 – порфірова; 4 – волокниста

однорідні (розмір зерен постійний) і різнозернисті (розмір зерен різний). Зцементовані піщані породи (псаміти) називаються піско-

виками.

Алеврити займають проміжне положення між піщаними і глинистими. До цих порід відносяться головним чином осади континентального походження: супіски, суглинки і лес.

До глинистих порід (пелітів) відносяться глини, аргіліти і глинисті сланці.

Для уламкових гірських порід особливо важливим для механічних властивостей є склад і будова цементів, які зв'язують окремі уламки в єдине ціле.

За складом цементуючі речовини бувають: кременисті (цемент з  $\text{SiO}_2$  або  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ); вапняні (цемент з  $\text{CaCO}_3$ ); глинисті (цемент з глинистої речовини).

За будовою цементуючі речовини бувають різних типів. Вони показані на рис. 2.

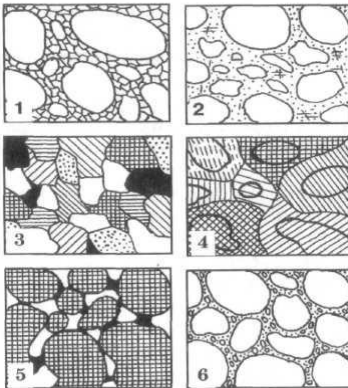


Рис. 2. Характерні типи структур цементів: 1 – монокристалічний; 2 – полікристалічний; 3 – регенераційний (цемент розростання); 4 – теж саме але без слідів первинних зерен; 5 – цемент механічного затоплення; 6 – контактний.

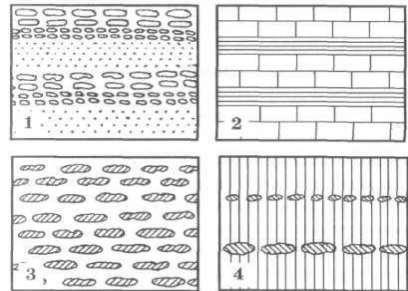


Рис. 3. Типи шаруватості. Шаруватість обумовлена: 1 – дисперсністю зерен; 2 – чергуванням шарів різного мінерального складу; 3 – горизонтальним орієнтуванням частинок; 4 – розміщенням в одній площині якогонебудь матеріалу.

Текстура гірських порід характеризує закономірності в розподілі структурних елементів на макрорівні. Основною текстурною ознакою осадових порід є шаруватість (рис. 3).

З шаруватістю пов'язана здатність гірських порід розділятися на окремі шари. Чим слабші сили взаємодії на контактні шарів, тим легше такі породи обвалюються.



Наступною текстурною ознакою є сланцюватість, яка відбувається за рахунок слабкого руху порід всередині земної кори. Проявляється вона у вигляді здатності породи розколюватись на тонкі пластинки по паралельним площинам.

Суттєвою текстурною ознакою гірських порід є їх пористість – відношення пор (пустот) до об'єму всієї породи. Чим вища пористість породи, тим менша її міцність.

### **Тріщинуватість породних масивів**

У результаті тектонічних рухів у земній корі виникають напруги, які досягнувши межі міцності порід приводять до утворення в ній розривів. Розриви сукупності порід виявляються, перш за все, у вигляді тріщин.

Тріщинами називають розриви в гірських породах, переміщення по яких абсолютно відсутні або незначні. Сукупність тріщин, що розчленовують ту або іншу ділянку земної кори, прийнято називати тріщинуватістю.

Випробовуване гірськими породами усестороннє стиснення або подальша цементация приводять до деякого відновлення зв'язності на поверхнях розриву сукупності, тому вони найчастіше володіють деяким зчепленням і опором відриву і називаються вже не тріщинами, а поверхнями послаблення. Проте вже в початковій стадії деформації масиву гірських порід на поверхнях послаблення виникають нові розриви сукупності – тріщини.

Тріщинуватість, як елемент структури, також є однією з характерних особливостей породного масиву.

Тріщини, простежені в гірських породах, прийнято ділити за генетичною ознакою на:

- природні (вродженні, первинні), що виникають в процесі формування геологічних тіл;
- тектонічні, що утворилися в результаті горотворчих процесів;
- штучні, що з'являються в процесі здійснення підготовчих і очисних робіт в шахтах, буропідривних робіт, а також внаслідок інших причин.

Природні тріщини є повсюдно поширеними, але найчіткіше вони виражені в осадових породах в областях з горизонтальним заляганням.

Тектонічні тріщини розвиваються в гірських породах під впли-

вом тектонічних сил, що виявляються в земній корі в процесі її утворення. Виникаючі при цьому деформації майже завжди супроводжуються розвитком в гірських породах тріщин, що утворюються, як на порівняно малих площах, так і на величезних. Відмінність їх від нетектонічних тріщин полягає, перш за все, у тому, що тектонічні тріщини володіють більшою витриманістю в орієнтуванні і розвиваються однаково в різних за складом породах. Тектонічні тріщини нахилені до площин нашарування під різними кутами; цим вони і відрізняються від тріщин вроджених (природних). Напрямок тектонічних тріщин співпадає з напрямком основних розривних порушень даного району. Так, наприклад, для цілого ряду районів Донбасу вроджені тріщини мають меридіональний напрям з відхиленням 15...20°.

Тектонічні явища сприяють розкриттю раніше схованих природних тріщин. Поверхні тектонічних тріщин звичайно покриті борознами ковзання, оскільки дуже часто вони є площинами зсуву порід. При тектонічних переміщеннях може відбуватися зсовування блоків один відносно одного.

Кожна окрема тріщина характеризується довжиною, шириною, звивистістю стінок, а також положенням тріщини в просторі, який в геології прийнято характеризувати кутом падіння і азимутом прямої падіння. Тріщини розрізняються також наявністю або відсутністю в них заповнювачів, відповідно до чого вони поділяються на відкриті і заповнені.

За розкритістю або потужністю заповнення виділяються наступні види тріщин: видимі неозброєним оком (відкриті, закриті і «волосяні») і мікротріщини. Ширина відкритих тріщин або потужність їх заповнення визначається безпосередніми вимірами, ширину закритих тріщин можна вважати рівною 0,8...0,5 мм, «волосяних» – 0,5...0,2 мм.

Заповнювач в тріщинах може бути представлений рихлими відкладеннями типу піщано-глинистих ґрунтів або утвореннями, відмінними від порід масиву за мінералогічним складом, але схожими з ними за структурними і фізичними властивостями.

Частота тріщин залежить від потужності і складу пласта. Наприклад, чим менша потужність пластів і міцність порід, тим частіші тріщини. За даними багатьох дослідників в карбонатних породах багатьох районів у пластах потужністю від 0,5 до 2,0 м цей

зв'язок прямолінійний. М.В. Рац вважає його параболічним.

Залежно від того як тріщини орієнтовані розрізняють впорядковану (одно-, двох системну) і неупорядковану тріщинуватість. Перетинаючись, тріщини розбивають порідний масив з деяким характерним розміром  $H$  на окремі структурні блоки з середнім розміром  $h_{cp}$ . Відношення  $H/h_{cp}$  називається інтенсивністю тріщинуватості. Крім того, для кількісної оцінки тріщинуватості використовують лінійний, площадковий і об'ємний коефіцієнти інтенсивності тріщинуватості. Вони є відповідно відношенням одиниці довжини, площі, об'єму до середньої відстані між сусідніми тріщинами  $l_{cp}$ , до площі  $S_{cp}$  і об'єму структурного блоку  $V_{cp}$ .

Роль природних тріщин у зміні механічної характеристики масиву гірських порід була предметом багаторічних досліджень колективів вчених різних країн.

М.М. Протодьяконов, вказуючи на відмінність між міцністю лабораторних зразків і міцністю масиву, в якості основної причина розглядав саме тріщинуватість порід і вугілля.

Слід зазначити, що тріщинуватість приводить до істотного зниження міцнісних характеристик порідного масиву. Відмінність міцності порід в зразку і масиві може бути досить значною. У зв'язку з цим при виконанні геомеханічних розрахунків обліку тріщинуватості масиву надається особливе значення.

### **Класифікація гірських порід**

*Класифікація гірських порід за характером внутрішніх зв'язків.* Стосовно кола задач, вирішуваних механікою гірських порід, породи зручно класифікувати за характером зв'язків між складаючими її мінеральними частинками. За цією ознакою виділяють наступні класи порід.

Тверді, в яких вміщуючі їх тверді мінеральні частинки зв'язані між собою жорстким зв'язком, що забезпечує збереження форми. До них відносяться магматичні, осадові зцементовані і метаморфічні породи. У цьому класі звичайно виділяють скельні і напівскельні породи. До скельних відносять міцні породи із структурними або пружними аморфними зв'язками кристалізацій. При насиченні водою сили зчеплення у таких порід не слабшають. Прикладами скельних порід служать граніти, діабазы, базальти, міцні пісковики вапняки. У напівскельних порід в присутності води зв'язки слаб-

шають, або зникають повністю. Зв'язок між мінеральними частинками може бути не тільки жорстким, але і пластичним. Прикладами таких порід є слабо зцементовані пісковики, слабкі вапняки, доломіт, мергелі. При деформації породи цього класу поведуться як пружні тіла.

У зв'язаних, або глинистих, порід зв'язок між мінеральними частинками забезпечується за допомогою обвиваючих їх тонких плівок води. При цьому можлива також слабка цементація. Глинисті породи містять велику кількість глинистих мінералів (каоолініт, монтморилоніт, гідрослюди і т.д.). Глинисті мінерали надають зв'язним породам цілий ряд специфічних властивостей, перш за все, пластичність. Їм характерна здатність до набухання і усадки. Таким чином, властивості зв'язаних порід значною мірою визначаються співвідношенням твердих, рідких і газоподібних складових, а також зерновим і мінералогічним складом. Залежно від цього глиниста порода може знаходитися в твердому, пластичному або текучому стані. За вмістом глинистих частинок у масі породи розрізняють глини (більше 30%), суглинки (30...10%) і супіски (до 10%).

Сипкі породи характеризуються повною відсутністю зв'язків між мінеральними частинками.

Окремо слід виділити клас порід, у яких мінеральні частинки роз'єднані водою. Це, перш за все, плавуні, а так само піски, насичені водою.

Дрібнодисперсні сипкі породи при насиченні водою проявляють властивості плавучості, тобто при оголенні укусу розпливаються подібно в'язкій рідині. Для з'ясування природи плавучості породу доцільно розглядати, як ту, що складається з двох фаз: твердої і рідкої.

Твердою фазою є мінеральні частинки крупністю більше 0,005 мм, що тимчасово знаходяться у зваженому стані.

Рідка фаза – це ґрунтова вода із зваженими найдрібнішими мінеральними частинками. Тут важливу роль виконує зв'язана вода, що складається з молекул, утримуваних дрібнодисперсними частинками. Підвищена густина зв'язаної води і велика поверхня частинок додають рідкій фазі особливі властивості: рідка фаза набуває великої густини, що досягає 1,5 г/см<sup>3</sup>, що збільшує її зважуючу дію. Завдяки цьому тертя між частинками твердої фази зменшується, а стійкість всієї системи знижується. Така система виявляється

значно чутливою до динамічних дій і інших імпульсів (вибухи, землетруси, вібрація, гідродинамічна дія). При силових діях може наступити розрідження піску, іноді на великих площах, з втратою несучої здатності, що супроводжується деформацією розташованих на них споруд. Схильними до переходу в стан плавучості є добре зкочені дрібнозернисті піски, що мають пористість більше 43% і ефективний діаметр менше 0,1 мм. Грубозернисті і середньозернисті піски навіть при вищій пористості не піддаються розрідженню.

По відношенню до води плавуні іноді підрозділяють на дві групи: типові, або істинні, плавуні, що не віддають воду, і осушувані плавуні, що віддають воду при утворенні поверхні порідного оголення. Типові плавуні значною мірою насичені дрібнодисперсними фракціями і містять зв'язану воду.

В осушуваних плавунях переважаючими є крупніші фракції: >0,005 мм, які схильні до осідання.

Найбільший об'єм всіх гірських робіт припадає на тверді породи, тому їх вивчення представляє основний інтерес в механіці гірських порід.

*Класифікація гірських порід за М.М. Протодяконовим.*

М.М. Протодяконов, один з основоположників аналітичних методів в механіці гірських порід, розглядав гірські породи як тіла деякою мірою незв'язані. Це дозволило йому знайти загальну основу для вирішення різних задач, як для сипких тіл, так і для зв'язних.

М.М. Протодяконов знайшов загальну основу для вирішення задач механіки гірських порід, зокрема, склавши класифікацію гірських порід за міцністю (табл. 1), яка знайшла широке практичне застосування.

Таблиця 1

Класифікація гірських порід за М.М. Протодяконовим

Категорія	Ступінь міцності	Породи	Коефіцієнт міцності
1	2	3	4
I	У вищому ступені міцні породи	Найбільш міцні, густі і в'язкі кварцити і базальти. Виключні за міцністю інші породи.	20

Продовження табл. 1

1	2	3	4
II	Дуже міцні породи	Дуже міцні гранітові породи. Кварцевий порфір, дуже міцний граніт, кременистий сланець, менш міцні ніж вказані вище кварцити.	15
III	Міцні породи	Граніт і гранітові породи. Дуже міцні піщаники і вапняки. Кварцові рудні жили. Міцний конгломерат. Дуже міцні залізні руди.	10
Ша	Те саме	Вапняки (міцні). Не міцний граніт. Міцні піщаники. Міцний мрамур, доломіт. Колчедани.	8
IV	Досить міцні породи	Звичайний піщаник. Залізні руди.	6
IУа	Те саме	Піщані сланці. Сланцеві піщаники.	5
V	Середні породи	Міцний глинистий сланець Немічний піщаник і вапняк, м'який конгломерат.	4
Уа	Те саме	Різноманітні сланці (не міцні). Густий мергель.	3
VI	Досить м'які породи	М'який сланець, дуже м'який вапняк, крейда, кам'яна сіль, гіпс. Мерзлий ґрунт, антрацит. Звичайний мергель. Зруйнований піщаник, зцементована галька і хрящ, каменистий ґрунт.	2
У1а	Те саме	Щебенистий ґрунт. Зруйнований сланець, злежана галька і щебінь, міцне кам'яне вугілля, затвердіваща глина.	1,5
VII	М'які породи	Глина (густа). М'яке кам'яне вугілля, міцний нанос – глинистий ґрунт.	1,0
УПа	Те саме	Легка піщана глина, гравій.	0,8
VIII	Земляні породи	Рослинна земля. Торф. Легкий суглинок, сирий пісок.	0,6

Продовження табл. 1

1	2	3	4
IX	Сипучі породи	Пісок, осипи, дрібний гравій, насипана земля, видобуте вугілля.	0,5
X	Плавучі породи	Пливуні, болотяний ґрунт, розлижений лес і інші розжижені ґрунти.	0,3

Як видно з табл. 1, породи розбиті за міцністю на десять категорій, п'ять з яких мають підкатегорії. Для того, щоб віднести породу до тієї або іншої категорії, необхідно знати коефіцієнт міцності. Для визначення цього коефіцієнта М.М. Протодюконов користувався результатами випробувань зразків гірських порід на одновісне стиснення. При визначенні коефіцієнта міцності приймається, що кожна одиниця міцності відповідає 10 МПа міцності на стиснення, тобто:

$$f = \frac{R_c}{10}, \quad (1)$$

де  $f$  – коефіцієнт міцності;  $R_c$  – одновісне стиснення зразка породи, кг/см<sup>2</sup>.

Для сипких порід коефіцієнт міцності приймається як числове значення коефіцієнта внутрішнього тертя.

#### Лекція 4.

#### Пружність, крихкість та пластичність гірських порід

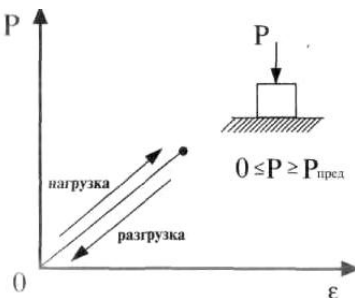


Рис. 1. Графік пружної деформації гірських порід

Здатність гірських порід чинити опір зовнішнім механічним діям встановлюється на спеціальних установках. У процесі випробувань за певними методиками визначаються деформаційні, міцнісні і реологічні показники. Залежно від швидкості навантаження породні зразки деформуються по-різному, у зв'язку з чим досить умовно говорять про їх пружні, крихкі або пластичні якості.

Здатність гірських порід повністю відновлювати первинну фор-

му після зняття навантаження називається пружністю. Графік деформації таких порід зображений на рис. 1.

Одним з проявів пружності гірських порід є крихкість. Крихкістю називають здатність твердих гірських порід руйнуватися без помітних деформацій (рис. 2, а).

Крихкості звичайно протиставляють поняття пластичності, під якою розуміють здатність гірських порід набувати незворотніх (залишкових) деформацій після зняття навантаження (рис. 2, б).

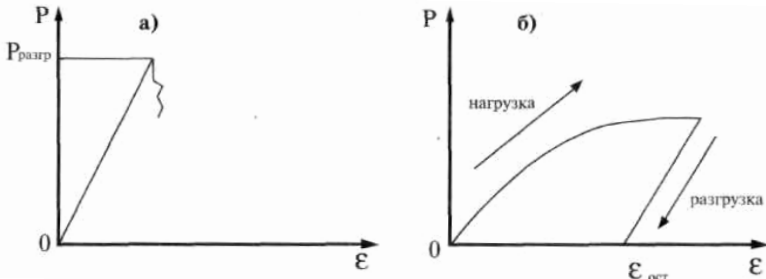


Рис. 2. Крихкість (а) і пластичність (б) гірських порід

Слід зазначити, що розподіл гірських порід на пружні і пластичні досить умовний: залежно від рівня і швидкості навантаження одні і ті ж породні зразки проявляють як пружні, так і пластичні властивості.

У цьому значенні пружність, пластичність і крихкість правильніше визначати не як властивості, а як стан гірських порід.

### Деформаційні та міцнісні характеристики гірських порід

*Деформаційні характеристики гірських порід.* Здатність гірських порід пружно деформувати характеризується такими показниками, як модуль пружності –  $E$  (модуль Юнга), коефіцієнт Пуассона –  $\mu$  та модуль здвигу –  $G$ .

Модуль пружності являє собою відношення величини нормального напруження  $\sigma$  до величини відповідної поздовжньої відносної деформації  $\varepsilon$  :

$$\dot{A} = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Коефіцієнт Пуассона – це відношення відносної поперечної до відносної поздовжньої деформації  $\gamma$ :



$$\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Модуль здвигу залежить від двох попередніх характеристик і визначається за наступною формулою:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (3)$$

Величина  $\mu$  змінюється для різних матеріалів у межах від 0 до 0,5.

Модуль Юнга може бути визначений при згинанні породного зразка у формі балки, яка має прямокутну форму чи круглу форму поперечного перерізу.

Балка виготовляється з відношенням довжини до висоти (діаметру) рівною 7...10. Вона вкладається на дві опори, навантаження  $P$  прикладене по середині. Величина прогину  $f$  вимірюється індикатором годинникового типу. Модуль Юнга визначають за формулою:

$$E = \frac{Pl^3}{48 \cdot If}, \quad \text{їїà} \quad (4)$$

де  $l$  – момент інерції поперечного перерізу зразка.

*Міцнісні характеристики гірських порід.* До міцнісних характеристик гірських порід відносяться: межа міцності на одновісне стиснення –  $R_c$ , межа міцності на одноосьовий розтяг –  $R_p$ , межа міцності на здвиг –  $R_\varphi$ , зчеплення  $C$  та кут внутрішнього тертя –  $\rho$ .

*Межа міцності на одновісне стиснення.* У даний час є велика кількість методів випробувань порід на одновісне стиснення, запропоновано різні способи визначення цього показника, розроблено численні методичні і нормативні вказівки.

При проведенні випробувань на одновісне стиснення передбачається, що в ідеальному з точки зору геометрії і структури зразку під дією зовнішнього навантаження, прикладеного до його верхньої та нижньої основи, виникає однорідне поле напружень і деформацій. Коли компоненти цього поля досягнуть певної величини, відбудеться руйнування зразка і межа міцності на одновісне стиснення визначиться як відношення руйнуючого зусилля  $P$  до площі поперечного січення зразка  $F$ :

$$R_c = \frac{P}{F}, \quad \text{їїà} \quad . \quad (5)$$

*Межа міцності на одновісний розтяг.* Для визначення міцності порід на одновісний розтяг використовують прямі та непрямі методи.

Головна трудність при проведенні прямих випробовувань на розрив питомих зразків полягає в закріпленні кінців в захватах розривної машини.

Кінці циліндричних зразків вставляються в спеціальні захвати, між поверхнею зразка і захватом заливається епоксидний клей чи розчин Вуда.

Довжина зразка повинна бути не меншою 2,5...3 діаметрів. Ця вимога не завжди виконується із-за обмежених розмірів проб і їхньої тріщинуватості.

Наряду з прямими методами випробувань гірських порід на стиснення і розтяг циліндричних чи призматичних зразків, широке застосування знайшли і непрямі, як більш прості та зручні.

За характером впливу на зразок зовнішніх сил непрямі методи можна розділити на чотири групи:

- метод розколювання зжимаючими навантаженнями;
- метод внутрішнього розриву;
- метод згину;
- метод продавлення зразків у формі породних дисків.

*Межа міцності на здвиг.* Одним з методів випробування гірських порід на здвиг є метод косоного зрізу та випробування на двоштинний зріз з стисканням та без нього.

При здвизі зі стисканням, як при косому зрізі, так і при двоштинному, є можливість визначення двох параметрів опору порід здвигу-зчеплення  $C$  і кут внутрішнього тертя  $\rho$ . Для дослідів виготовляють зразки правильної геометричної форми у вигляді кубів чи прямокутних призм.

При косому зрізі зразки розміщують у спеціальних сталених матрицях. Процес здвигу розпочнеться тоді, коли буде дотримана вимога:

$$\tau > C + f\sigma_n, \quad (6)$$

де  $\tau$  – дотична складова напруження;  $f$  – коефіцієнт внутрішнього

тертя;  $\sigma_n$  – нормальна складова напруження.

Здійснивши здвиг при двох різних кутах  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  отримаємо коефіцієнт внутрішнього тертя:

$$f = \frac{\sigma_1 \sin \alpha_1 - \sigma_2 \sin \alpha_2}{\sigma_1 \cos \alpha_1 - \sigma_2 \cos \alpha_2}. \quad (7)$$

Формула для знаходження зчеплення запишеться у вигляді:

$$C = \sigma_1 \sin \alpha_1 - \sigma_1 \cos \alpha_1, \quad (8)$$

де  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – напруження на площадках зрізу при першому і другому випробуваннях.

При випробуванні гірських порід за даною схемою до зразків висувають високі вимоги: розміри їх повинні чітко відповідати розмірам матриць, кути між гранями повинні бути прямими. Невелике відхилення в лінійних розмірах по висоті і величині кута між гранями призводить до спотворень, що обумовлює досить значне розкидання результатів випробувань при косому зрізі.

Двохплощинний зріз зразків порід здійснюють за такою схемою: зразки у вигляді прямокутних балочок встановлюють в матриці та за допомогою пуасонів зрізують пресом.

При відсутності зусиль в горизонтальному напрямку коефіцієнт зчеплення визначається за умови

$$C = \frac{P}{2F} \quad (9)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу балочки.

Для отримання величини коефіцієнта внутрішнього тертя необхідно перед зрізом до зразка прикласти до зразка в горизонтальному напрямку деяку силу  $N$ , тоді коефіцієнт внутрішнього тертя  $f$  буде рівний:

$$f = \frac{P - 2CF}{2N}, \quad (10)$$

де  $P$  – зусилля руйнування;  $N$  – деяка сила в горизонтальному напрямку.

Слід відмітити, що такі міцні сні характеристики гірських порід,

як зчеплення –  $C$  і кут внутрішнього тертя –  $\rho$ , були привнесені в механіку гірських порід з механіки ґрунтів.

## Лекція 5.

### Деформування і руйнування гірських порід за межею міцності

У процесі навантаження породний зразок проходить ряд послідовних напружено-деформованих станів від нульового до граничного. У найпростішому випадку при одноосному стисненні (розтягуванні) одному компоненту напруги відповідає один компонент відносних повздовжніх деформацій:  $\sigma = f(\varepsilon)$ . Досягти граничного стану ( $\sigma_{\bar{\alpha}\delta}, \varepsilon_{\bar{\alpha}\delta}$ ) можна двома шляхами: у режимі заданих навантажень (РЗН) і в режимі заданих деформацій (РЗД). У першому випадку на пульті преса задають послідовно з певним інтервалом навантаження і фіксують в автоматичному режимі відповідні прирости деформацій. Досягши граничних навантажень  $P_{cp}$  починають руйнуватися перші структурні зв'язки і потенційна енергія, накопичена у випробувальній машині, викликає лавиноподібне руйнування зв'язків, які залишилися, що приводить до руйнування зразка.

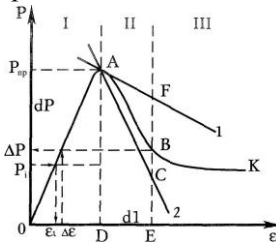


Рис. 1. Деформування гірських порід за межею міцності: 1 – характеристика нежорсткого преса; 2 – характеристика жорсткого преса

Інша картина руйнування спостерігається при випробуваннях зразків у режимі заданих деформацій. У цьому випадку випробувальна машина повинна бути сконструйована так, щоб була можливість задавати деформацію, що строго фіксується, з кроком  $\gamma$  і вимірювати відповідні їй зміни навантаження  $P$ .

Характерний графік деформації зразка гірської породи  $OAB$  приведений на рис. 1. При деформації після досягнення межі міцності зразок знижує свій опір: на ділянці деформування  $DE$  опір зразка падає від точки  $A$  до точки  $B$ . Енергія, необхідна для деформування зразка на цій ділянці, рівна площі  $ABED$ . На початку розглядуваної ділянки (точка  $A$ ) опір зразка і сила преса були рівними між собою. При цьому напруженні частини преса виявля-

ються пружно деформованими.

Енергія пружної деформації накопичується в колонах преса, в зігнутих траверсах, у стиснутому маслі гідроциліндрів. При зменшенні відстані між плитами пресу на величину DE створюване їм зусилля зменшиться на величину  $dP$ . При цьому, якщо прес недостатньо жорсткий, зусилля знизиться до точки F і потенційна енергія, що виділилася при цьому, рівна площі AFED, перевищить енергію, необхідну для руйнування зразка на ділянці DE. Надлишок енергії, рівний площі AFB, піде на прискорення навантажуючих частин преса, процес руйнування стає некерованим і супроводжуватиметься динамічними явищами (ударом, розльотом осколків).

Якщо ж прес має жорстку конструкцію і його елементи мало деформуються під навантаженням, то зменшення відстані між плитами викличе зниження зусилля преса до точки C, лежачої нижче характеристики зразка. Енергія ACED, що виділяється при цьому, менша необхідної енергії руйнування зразка і тому руйнування лише за рахунок енергії пружних деформацій пресу неможливе. Для переведення зразка із стану A в стан B необхідна додаткова енергія, яка рівна площі ABC, що підводиться ззовні, наприклад, шляхом підкачки масла в гідросистему пресу.

Таким чином, для отримання поза межних характеристик породних зразків необхідно, щоб характеристика пресу була крутішою поза межної частини графіка деформації зразка. Крутизна характеристики називається жорсткістю пресу і визначається за формулою:

$$Q = \frac{dP}{dl}, \quad (1)$$

де  $dP$  – зміна зусилля пресу при зміні відстані між його навантажувачими поверхнями на величину  $dl$  при інших постійних параметрах.

Практика показує, що для отримання поза межних характеристик досить, щоб жорсткість пресу визначалась співвідношенням:

$$Q = 4 \cdot 10^4 F, \quad \text{Н/см} \quad (2)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу зразка,  $\text{см}^2$ . Характерний графік поза межного деформування гірських порід приведений на рис. 2.

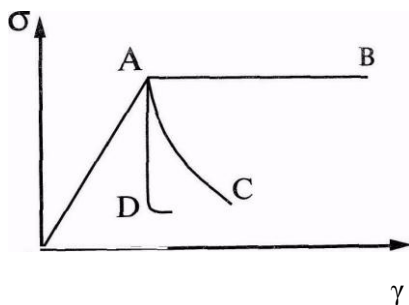


Рис. 2. Графік деформування

називати модулем крихкості, або модулем спаду  $M$ . У цьому випадку породи з  $M \rightarrow 0$  вважатимуть крихкими, з  $M \rightarrow \infty$  – пластичними.

Для випробування гірських порід у режимі контрольованого руйнування в умовах об'ємного стиснення зразки випробовують в особливих приладах – стабілометрах, в яких робочим тілом, що створює бічне навантаження, служить рідина, наприклад, трансформаторне масло. Загальний вигляд графіка деформування мармуру в об'ємному напруженому стані приведено на рис. 3.

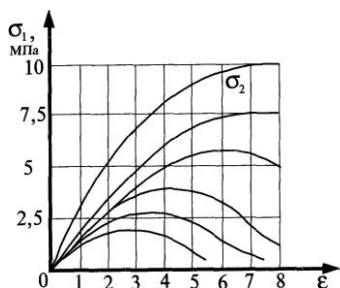


Рис. 3. Деформування мармуру за межею міцності в умовах об'ємного навантаження

При жорсткому навантаженні гірських порід виділяють наступні етапи деформації (див. рис. 1.):

*I – етап пружної деформації:* прирости осьових  $\Delta \varepsilon_z$  і радіальних  $\Delta \varepsilon_r$  відносних деформацій на цьому етапі зв'язані коефіцієнтом Пуассона  $\mu$ :

$$\Delta \varepsilon_r = -\mu \Delta \varepsilon_z. \quad (3)$$

Збільшення осьових деформацій викликає зменшення об'єму зразка.

*II – етап дилатанції:* на цьому етапі відбувається розвиток тріщин у зразку, що супроводжується його розпушуванням, збільшенням об'єму і порівняно швидким збільшенням діаметру; приріст осьових і радіальних деформацій зв'язаний коефіцієнтом дилатанції  $\beta$ :

$$\Delta \varepsilon_r = -\beta \Delta \varepsilon_z. \quad (4)$$

*III – етап еквіволюміальний:* на цьому етапі об'єм зразка залиша-

Крутизна позамежної частини графіка деформації показує схильність породи до крихкого руйнування.

Аналогічно тому, як величина  $E$  в пружній частині domeжевої деформації називається модулем пружності, пропонується величину  $d\sigma/d\varepsilon$  у позамежній частині

ється постійним, а приріст осевих і радіальних деформацій зв'язаний співвідношенням:

$$\Delta \varepsilon_r = -0,5 \Delta \varepsilon_z. \quad (5)$$

Поза межна деформація порід – цілком реальний процес, що має місце в гірських виробках: деформація порідних ціликів, приконтурного масиву виробок, краєва частина вугілля в лавах і т.п.

Значні дослідження деформації гірських порід за межею міцності були виконані А.Н. Ставрогиним і А.Г. Протосеней, В.В. Виноградим.

### Масштабний ефект в гірських породах

У результаті виконання великої кількості випробувань на одновісне стиснення, було встановлено, що міцність геометрично подібних зразків неоднакова. Це явище було назване масштабним ефектом, а причини, що його викликають, масштабним фактором.

Цікаво, що зміна показника міцності може коливатися як в бік його зменшення, так і в бік збільшення. Так, наприклад, дослідження Е.І. Ільницької показали, що міцність зразків мармуру при збільшенні їх діаметру в 5,8 рази знизилася в 1,33 рази (рис. 4), а зразків габро – 1,15 рази.

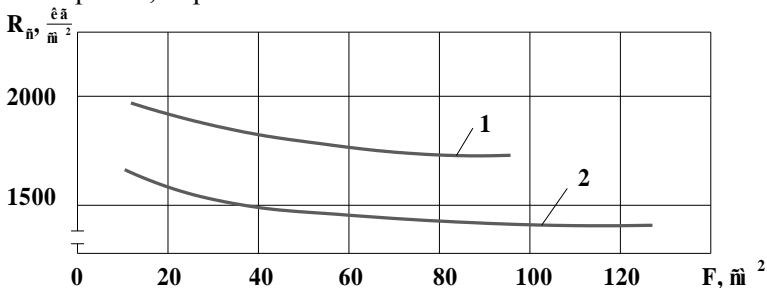


Рис. 4. Залежність міцності зразків від їх розмірів (за Е.І. Ільницькою): 1 – габро, 2 – мармур

Аналогічні результати були отримані і іншими дослідниками.

Разом з тим, є ряд досліджень, виконаних достатньо коректно, які показують, що із збільшенням розмірів зразка міцність його росте. Пояснення цьому дав М.І. Койфман. На його думку існує два види масштабного ефекту: поверхневий і об'ємний.

*Поверхневий масштабний ефект* з'являється внаслідок поруше-

ння поверхневого шару зразка при обробці. Причому, чим менший зразок, тим істотніше проявляється поверхневий ефект.

Суть *об'ємного масштабного ефекту* полягає у тому, що для реальних структурно неоднорідних тіл вірогідність появи дефекту (тріщина, слабе включення і т.п.) вища у крупних тіл. Тому із збільшенням об'єму міцність зразків неминуче повинна падати. Об'ємний масштабний ефект М.І. Койфман назвав головним.

Природно припустити, що міцність на одновісне стиснення породного зразка буде завжди вищою, ніж міцність масиву гірських порід.

У зв'язку з цим було введено поняття коефіцієнта структурного послаблення, рівного відношенню межі міцності на одновісне стиснення порідного масиву  $R_M$  до межі міцності зразка, тобто:

$$k_c = \frac{R_M}{R_c}. \quad (6)$$

Встановлення об'єктивного значення величини  $k_c$  являє собою важку задачу, вирішенню якої присвячені численні аналітичні та експериментальні роботи.

### **Реологічні властивості гірських порід**

Механічні характеристики гірських порід визначають звичайно при короткочасному прикладенні навантажень. Елементи ж систем розробки, гірські виробки, кріплення сприймають навантаження протягом багатьох років.

Питаннями поведінки матеріалів, в т.ч. і гірських порід, в умовах тривалих силових дій займається реологія – наука про текучість речовини.

Залежно від зовнішніх умов, зміна напружено-деформованого стану твердого тіла в часі може йти двома шляхами. Наприклад, навантажимо зразок гірської породи, що має форму циліндра, деяким постійним не руйнуючим навантаженням, що створює практично миттєво цілком певну відносну деформацію, величина якої залежить від модуля пружності матеріалу і величини прикладеного навантаження. У подальші моменти часу, не дивлячись на те, що напруги не міняються, деформація не залишатиметься постійною, як це витікає із закону Гука. Величина її монотонно зростатиме.



Реологічне явище, яке заключається в тому, що з часом при постійному напруженні спостерігається зростання деформацій, носить назву повзучості деформацій.

У іншому випадку здавимо зразок між двома плитами пресу так, щоб протягом всього досліду відстань між ними була строго фіксованою, тобто, щоб не змінювалась в часі. Станемо вимірювати тиск на плити пресу з боку зразка і переконаємося, що з часом величина його падатиме.

Реологічне явище, яке заключається в тому, що з часом при постійній деформації спостерігається зменшення рівня напруження називається релаксацією напружень.

Задачею реології є опис напружено-деформованого стану гірських порід і інших матеріалів з урахуванням їх схильності до повзучості і релаксації. Ця задача зводиться до складання так званих рівнянь стану, тобто таких рівнянь, які зв'язують в єдині співвідношення компоненти напружень, деформацій і їх похідних за часом.

У всіх наявних дослідженнях вважається, що рівняння стану достатньо точно описують зміни напружено-деформованого стану матеріалів у тому випадку, якщо зовнішні умови такі, що деформації і напруження не можна вважати постійними.

Для наочності представлення реологічних процесів звичайно використовують метод структурних моделей. Цей метод полягає в тому, що властивості тіла описуються за допомогою особливим чином підібраної механічної моделі. Модель повинна складатися з елементів, що ідеально відображають основні – фундаментальні якості вихідного матеріалу. Так, наприклад, при певному рівні навантажень і достатньо швидкому їх прикладанню всі тверді і зв'язні гірські породи поведуться як пружні тіла, що підкоряються закону Гука. Ця властивість твердих тіл моделюється пружиною, жорсткість якої пропорційна модулю пружності (елемент Гука) (рис. 5, а). Пружні властивості твердих тіл не залежать від часу:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \rightarrow t = 0. \quad (7)$$

Спеціальними дослідженнями встановлено, що межі зерен в полікристалічних матеріалах, до яких відносяться і гірські породи, поведуться як в'язка рідина. Ця обставина призводить до того, що

температура певним чином змінює внутрішню тертя в таких тілах, їх деформаційні і міцнісні характеристики. В умовах достатньо тривалих зовнішніх навантажень полікристалічні матеріали поведуться в цілому, як дуже в'язка рідина.

В'язкі властивості матеріалів моделює елемент Ньютона (рис. 5, б), який являє собою демпфер-циліндр з отворами, який занурений у в'язку рідину. Швидкість деформації в цьому випадку пропорційна діючому напруженню

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\xi} \sigma, \quad (8)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт в'язкості,  $\frac{1}{\xi}$  – коефіцієнт текучості.

При заданому постійному напруженні повна деформація до моменту часу  $t$  буде рівна:

$$\varepsilon = \frac{1}{\xi} \sigma_0 t,$$

а при напруженнях, які змінюються в часі:

$$\varepsilon = \frac{1}{\xi} \int_0^t \sigma(t) dt.$$

При достатньо великих навантаженнях у гірських породах починається руйнування внутрішніх структурних зв'язків, що приводить до утворення необоротних (пластичних) деформацій. Цю властивість реальних твердих тіл відображає елемент Сен-Венана. Він є елементом сухого тертя: брусок, що лежить на жорсткій

поверхні (рис. 5, в). При навантаженні, меншому деякої критичної величини  $S$ , деформація рівна нулю, при більшому – деформація не визначена: система приходить у рухомий стан і брусок залишається

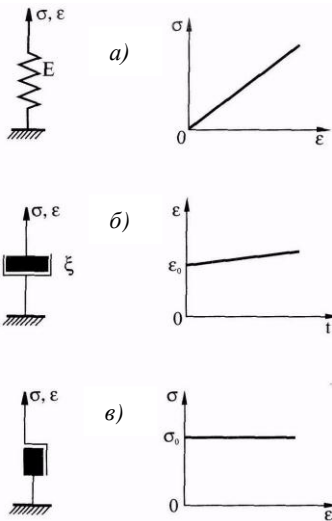


Рис. 5. Елементарні реологічні моделі: а) Гука; б) Ньютона; в) Сен-Венана

там, де припинилася дія сили.

Таким чином, розглянуті вище елементарні механічні моделі мають цілком певну фізичну основу. З'єднуючи структурні елементи один з одним тим або іншим чином, створюють складніші моделі, що у значній мірі відображають реальні властивості конкретних матеріалів.

## Лекція 6.

### Поняття про теорію спадкової повзучості

Згідно сучасних уявлень, напруження, що виникають у реальних тілах, складаються з двох частин: перша складова залежить від деформації в даний момент часу  $t$ , друга – від деформацій, що існували в тілі протягом часу, що передував справжньому моменту часу –  $\tau$ . Час змінює структуру.

Теорія, що дозволяє визначати деформації в середовищі з урахуванням історії її навантаження, називається теорією спадкової повзучості.

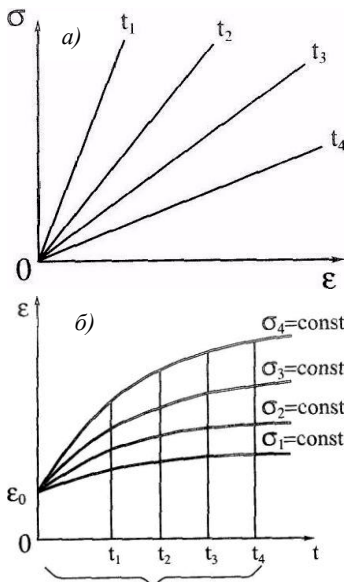


Рис. 1. Деформування в часі спадкового середовища

Теорія спадкової зміни внутрішніх чинників з урахуванням «пам'яті» матеріалу про всі тимчасові структурні зміни, що виникають у процесі навантаження, і допускаюча лінійну залежність між напруженнями і деформаціями у будь-який момент часу, одержала назву теорії лінійної спадкової повзучості.

Теорія лінійної спадковості була запропонована Л. Больцманом з використанням математичного апарату інтегральних рівнянь В. Вольтера.

Відповідно до цієї теорії, деформації середовища під дією зовнішніх сил продовжуються і після їх прикладання (спадковість), при цьому деформації в кожен момент часу прямо пропорційні діючим у різні моменти часу напруженням (лінійність) сумуються, ростуть у часі (принцип суперпозиції).

Проілюструємо вище викладене на наступному прикладі. Побудуємо криві повзучості  $\gamma=f(t, \sigma)$  при різних рівнях напруження (рис. 1, а). Потім в координатах « $\sigma - \gamma$ » побудуємо графіки в моменти часу  $t_i$  ( $i=1,2,3\dots$ ) (рис. 1, б). Якщо ізохорні залежності, що вийшли при цьому, є прямими лініями (або близькими до них), то ми маємо справу з лінійним спадковим середовищем.

Повзучість матеріалів в теорії лінійної спадковості описується інтегральним рівнянням Вольтера другого роду:

$$\gamma(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t L(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (1)$$

де  $\sigma(t)$  і  $\gamma(t)$  – напруження і деформації в даний момент часу  $t$ ,  $t - \tau$  – час, який передує моменту часу  $t$ ;  $L(t)$  – деяка функція, яка враховує вплив часу на деформації і напруження в тілі.

При  $\sigma(t) = \sigma_0 = const$  із співвідношення (1) отримаємо рівняння повзучості деформацій:

$$\gamma(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 + \int_0^t L(\tau)d\tau \right). \quad (2)$$

Диференціюючи обидві частини рівняння (2) по часу, отримаємо вираз:

$$L(t) = \frac{Ed}{\sigma_0} \cdot \frac{\varepsilon}{dt},$$

з якого слідує, що  $L(t)$  являє собою функцію швидкості повзучості. Функцію ж  $L(t-\tau)$  називають ядром інтегрального рівняння Вольтера (1). Розв'язуючи це відносно  $\sigma(t)$ , отримаємо,

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon_0 - \int_0^t K(t-\tau)\varepsilon(\tau)d\tau. \quad (3)$$

При  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 = const$  з (3) отримаємо рівняння релаксації напружень:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon_0 \left( 1 - \int_0^t K(\tau) d\tau \right). \quad (4)$$

Диференціюючи обидві частини (4) по  $t$ , отримаємо вираз для  $K(t)$ :

$$K(t) = -\frac{1}{E \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt}.$$

Функції  $K(t)$  і  $L(t)$  взаємопов'язані і це дозволяє за однією з них знайти іншу. Функція  $K(t)$  називається резольвентою інтегрального рівняння Вольтера (2).

Рівняння повзучості (2) можна записати у вигляді:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\bar{E}},$$

де  $\bar{E}$  – тимчасовий оператор, який визначається у результаті обробки експериментальних даних.

Ю.Н. Работнов показав, що задачу лінійної спадковості можна формально розглядати, як задачу теорії пружності, в якій замість пружних постійних  $E$  і  $\mu$  необхідно використовувати їх тимчасові аналоги (інтегральні оператори)  $\bar{E}$  і  $\bar{\mu}$ . Ж.С. Ержанов встановив, що деформація ряду гірських порід до певного рівня навантаження відповідає рівнянню (2) з ядром повзучості у вигляді степеневій функції (ядро типу Абеля):

$$L(t, \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha},$$

де  $\delta$  і  $\alpha$  – реологічні характеристики, отримані експериментально.

Інтегральне рівняння повзучості з ядром Абеля має наступний розв'язок:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 + \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right) = \frac{\sigma_0}{E}. \quad (5)$$

Складність рішення задач методами теорії спадкової повзучості полягає в розшифровці тимчасових операторів.

Часто при постійності граничних умов для вирішення задач геомеханіки використовують метод змінних модулів, який полягає у тому, що замість інтегральних операторів  $\bar{E}$  і  $\bar{\mu}$  використовують часові функції  $E(t)$  і  $\mu(t)$ .

З виразу (5) слідує, що функція часу модуля деформації має вигляд

$$E(t) = \frac{E}{1 + \hat{O}},$$

де  $\Phi$  – функція повзучості, яка рівна:

$$\hat{O} = \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1-\alpha}.$$

Функція часу для коефіцієнта Пуассона визначається за формулою:

$$\mu(t) = 0,5 - \frac{0,5 - \mu}{1 + \hat{O}}.$$

Слід відмітити, що використання теорії спадкової повзучості виправдане тільки в тому випадку, коли діюче напруження не перевищує тривалої міцності масиву.

### **Визначення механічних властивостей гірських порід у натурних умовах**

Як вже наголошувалося вище, механічні властивості гірських порід, одержувані в лабораторних умовах, не відповідають механічним властивостям реальних масивів гірських порід і ця невідповідність проявляється у вигляді масштабного ефекту. Про зразок гірських порід можна говорити як про деяку ідеалізовану модель породного масиву. Відмічена обставина послужила приводом для дослідження шляхів отримання механічних констант в натурних умовах, тобто безпосередньо в гірських виробках.

Для визначення межі міцності на одноосне стиснення і деформаційних характеристик відомі наступні схеми. У гірській виробці в процесі проходки залишали невеликі цілики незайманої породи, яким потім пилами надавали по можливості правильну геометричну

форму. За допомогою гідродомкратів, здатних розвивати зусилля в 150...200 т, стовп навантажувався до руйнування. У процесі навантаження вимірювалися деформації вертикальні і горизонтальні, що дозволяло визначити пружні показники. Для рівномірної передачі тиску під опорою домкрата влаштували спеціальне ліжко з піску, мідного листа і шару бетону. Стовпи розміром  $0,6 \times 0,6 \times 1,0$  м розташовували з урахуванням залягання порід – перпендикулярно і паралельно нашаруванню.

Для вивчення опору здвигу порід в ВНІМІ проводилися досліди за схемою, яка зображена на рис. 2. Для визначення параметрів зчеплення –  $C$  і кута внутрішнього тертя –  $\rho$  досліди проводилися під різними кутами  $\nabla$  до нашарування.

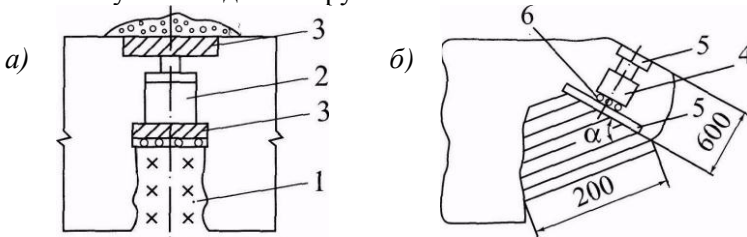


Рис. 2. Схеми випробування гірських порід у виробках: а) на стиснення; б) на здвиг; 1 – стовп породи; 2 – домкрат; 3 – сталеві плити; 4 – домкрат; 5 – плити; 6 – ролики

Отримання механічних констант гірських порід в натурних умовах пов'язане із значною трудомісткістю робіт. Ці унікальні експерименти мають швидше методологічне значення, ніж практичне.

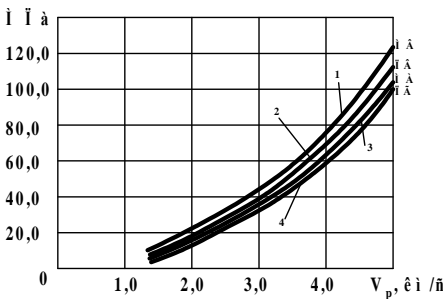


Рис. 3. Зв'язок акустичних і міцнісних властивостей для алеволітів (1 –  $R_c=59,6 \cdot V_p^2$ ; 2 –  $R_c=52,0 \cdot V_p^2$ ; 3 –  $R_c=48,9 \cdot V_p^2$ ; 4 –  $R_c=47,1 \cdot V_p^2$ )

Перспективними слід визнати методи, основані на встановленні кореляційної залежності між визначуваними механічними константами і швидкістю проходження акустичних (ультразвукових) коливань через порідний масив. Такі дослідження масово були виконані Л.В. Шаумяном для Норільського родовища полі-

металів і О.С. Алферовим для осадових порід Донбасу. Особливе значення має робота, в якій породи одного і того ж літологічного різновиду розділені на літологічні типи залежно від фаціальної приналежності, для яких і визначалися кореляційні залежності. Приклад такої залежності приведений на рис. 3.

### **Статична обробка результатів вимірювань**

Всі реальні процеси, що відбуваються у природі, обумовлені великою кількістю зовнішніх і внутрішніх чинників, які діють випадковим чином. Наприклад, процес руйнування породних зразків одного і того ж літологічного різновиду, певної фаціальної приналежності протікає у кожному окремому випадку по-різному. Це обумовлено випадковою формою структурних зв'язків, величиною вологи, що міститься в зразку, наявністю текстурних особливостей (внутрішні чинники), а також дещо відмінними розмірами зразка, технологією їх виготовлення, і швидкістю навантаження (зовнішні чинники). Таким чином, процес руйнування зразків з метою отримання їх механічних характеристик – це випадковий процес. Для кожного випробуваного зразка в процесі лабораторних досліджень одержують своє, відмінне від інших, значення механічної характеристики.

Для отримання достовірних значень шуканої механічної характеристики необхідно виконати вимірювання як на найбільшому числі зразків. Для цього проби, що йдуть на подальше виготовлення зразків, відбирають за певною методикою так, щоб вони в максимально представляли всі можливі для даного породного масиву коливання мінерального складу і структурних особливостей.

За спеціальними методиками встановлюється необхідне число зразків, відповідно до якого з генеральної сукупності випадково відбирають певну кількість проб. Відібрана партія проб являє собою випадкову вибірку. З кожної проби виготовляють 3...4 зразки максимально допустимих за даною методикою розмірів.

Результати вимірювань кожної групи зразків по всій випадковій вибірці піддають статичній обробці. Перш за все, визначають середнє арифметичне значення всіх  $n$  вимірювань параметра  $X_i$ :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (6)$$



Потім визначають:

- середнє квадратичне відхилення одиничного результату:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}. \quad (7)$$

- коефіцієнт варіації (%), тобто середнє відносне відхилення отриманих результатів вимірювань від середнього арифметичного:

$$\eta = \frac{S_n}{X} \cdot 100\%. \quad (8)$$

- довірчий інтервал

$$\Delta X = \frac{t_{na} S_n}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

Коефіцієнт Стюдента  $t_{na}$  враховує відмінність випадкової вибірки від генеральної сукупності і залежить від числа зразків  $n$  і потрібної довірчої ймовірності. Кінцевий результат статичної обробки результатів вимірювань записується, наприклад, наступним чином:

$$R_c = (200 \forall 10) \ddot{H} \ddot{a} \quad i \ddot{d} \ddot{e} \quad \forall = 0,95.$$

Запис показує, що середнє значення параметра (межа міцності на одновісне стиснення) рівне  $200(\bar{X})$ , а відхилення його від арифметичного в 95% випадків не перевищує  $10(X)$ .

З формули (9) легко визначити необхідну кількість випробувань для забезпечення похибки вимірювань не більше, ніж при  $\xi = \frac{\Delta X}{X}$  відомому коефіцієнті варіації параметру, що вивчається:

$$n = \left( \frac{t_{na} \cdot \eta}{\xi} \right)^2.$$

Так, якщо  $\eta = 20\%$ , похибка вимірювань 15%, то кількість

зразків  $n = 7$  (при  $\nu=0,95$ ,  $t_{na} = 1,96$ ).

#### **Тема 4. Лекція 7. НАПРУЖЕНИЙ СТАН ГІРСЬКИХ ПОРІД ТА ОСНОВНІ СПІВВІДНОШЕННЯ МЕХАНІКИ СУЦІЛЬНО ДЕФОРМУЮЧОГО ТІЛА**

##### **Елементарний об'єм породного масиву**

Основним у механіці суцільного тіла, що деформується, являється припущення про те, що дане середовище позбавлене структури й володіє суцільністю з неперервним розподіленням речовини, так званий континуум. Ця гіпотеза дозволяє рахувати напруження й деформації неперервними й диференційованими функціями координат точок тіла. Припускається також, що любі достатньо малі, тобто елементарні об'єми, розглядуваного середовища володіють однаковими фізико-механічними властивостями. Стосовно механіки гірських порід, таким гіпотетичним суцільним і однорідним тілом є породний масив, що вміщує гірські виробки. Проте реальний породний масив, як природна система, має високий ступінь нерегульованості, в якому залежно від розмірів області, що вивчається, можна виділити чотири масштабних рівні неоднорідності :

1. *Мікроскопічний*: середовище розглядається на рівні кристалів, розмір елементів неоднорідностей складає  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  м;

2. *Субмікроскопічний*: середовище розглядається на рівні елементарного об'єму літологічного різновиду, розмір елементів неоднорідностей складає  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  м;

3. *Макроскопічний*: середовище розглядається на структурному рівні, розміри елементів неоднорідностей складають  $10^{-2} \dots 10^{-1}$  м;

4. *Мегаскопічний*: середовище розглядається як складно-структурне утворення, яке володіє текстурою й знаходяться під дією гравітаційних і тектонічних сил, розмір елементів неоднорідностей складає біля 1,0 м.

Перших два рівні вивчає фізика гірських порід, а два наступних – це предмет досліджень механіки гірських порід.

На макроскопічному рівні гірські породи володіють внутрішньою неоднорідністю. Вони містять полікристали мінералів різної міцності, мікротріщини, пори, включення й інші дефекти, що приводять до місцевої концентрації напружень. Проте, оскільки цих мікродефектів дуже багато, то в силу статичних законів в одних і

тих же умовах відносні переміщення точок реального деформованого тіла ( $B$  і  $B_1$ ) будуть практично співпадати з переміщеннями відповідних точок ( $A$  і  $A_1$ ) однорідної моделі (рис. 1). При цьому, чим менші розміри мікро дефектів й чим їх більше, тим менша похибка, пов'язана із застосуванням методів механіки суцільного середовища.

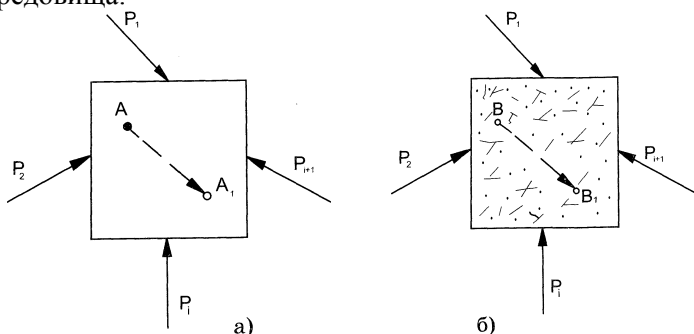


Рис. 1. Однорідна (а) і неоднорідна (б) моделі породного середовища

З вище сказаного витікає, що елементарний об'єм породного масиву повинен бути достатньо малим, щоб виконувалась початкова умова про сукупність середовища, і в той же час, достатньо великим, щоб він володів усіма властивостями об'єкту, що вивчається, на субмікроскопічному рівні.

Такий елементарний об'єм називають фізично малим. Його можна представити у вигляді куба, що має відповідне число граней і ребер. Грань такого куба утворює елементарний майданчик, а ребро – елементарну довжину.

Задача про можливу величину похибки, одержаної внаслідок заміни реального неоднорідного середовища однорідною суцільною моделлю, була поставлена і вирішена Ф.С. Ясинським у 1887 р. У результаті її вирішення було встановлено, що величина можливої похибки залежить від характерних розмірів досліджуваної області  $L$  і розмірів  $l$  складаючих її елементарних частин (об'ємів). Згідно теорії Ф.С. Ясинського, середовище можна вважати ідеальним (суцільним і однорідним), якщо має місце нерівність:

$$\frac{L}{l} > a^2, \quad (1)$$

де  $a$  – деяке, досить велике число, вибране з таким розрахунком,

щоб при прийнятому ступені точності величина  $a^{-1}$  була значно меншою за одиницю і нею можна було б знехтувати.

Пізніше, для металів, були поставлені спеціальні досліди, які показали, що дрiт з особливої сталі з ясно вираженою зернистою структурою має по довжині цілком постійні властивості, якщо кількість зерен в її поперечному перерізі стає більшою 30.

Іншими дослідями з металами було встановлено, що при вимірюванні деформацій тензорезисторами з малою базою, показання їх стають стабільними, якщо в межах бази знаходиться більше 10 зерен структури.

К.В. Руппенейт і Ю.М. Ліберман, вирішуючи спеціально поставлену для цієї мети статистичну задачу, визначили, що з ймовірністю 0,98 грань елементарного об'єму пісковики повинна мати розмір близько 29 мм і містити не менше 8 зерен.

У даний час нерідко використовують класифікацію осадових порід за крупністю зерна, запропоновану ИГН АН СРСР (табл. 1). У цій же таблиці приведений орієнтований розмір елементарного майданчика.

Таблиця 1

Розмір елементарної площадки для осадових порід

Найменування породи	Середній розмір зерен, мм	$l$ , мм
Конгломерат	10,0	67
Гравеліт	1,0...10,0	6,7...67
Піщаник крупнозернистий	0,5...1,0	3,3...6,7
Піщаник середньозернистий	0,25...0,5	1,7...3,3
Піщаник дрібнозернистий	0,1...0,25	0,7...1,7
Алевроліт крупнозернистий	0,05...0,1	0,3...0,7
Алевроліт дрібнозернистий	0,01...0,05	0,1...0,3
Аргіліт	0,01	0,1

Розмір  $L$  досліджуваної області в задачах механіки гірських порід, як правило, на порядок більший розмірів виробок і рівний 40...50 м. Величина  $a^{-1}$  для виробок, заложених навіть у такій неоднорідній породі, як конгломерат, у відповідності до табл. 1. рівна 0,012, в аргіліті – 0,005, що значно менше одиниці, як того й вимагає теорія Ф.С. Ясинського.

Таким чином, при вивченні механічних явищ, що відбуваються в

породному масиві навколо виробок, цілком обґрунтовано можна застосовувати співвідношення механіки суцільно деформованого тіла, основані на гіпотезі неперервного однорідного середовища.

Перехід від сумакроскопічного рівня неоднорідностей породного масиву до макро- і мегаскопічного виконується з врахуванням масштабного ефекту.

### Напружений стан гірських порід

За сучасними уявленнями, одержаними для глибинних зон на підставі сейсмічних досліджень, в Землі виділяють кору, верхню і нижню мантію, зовнішнє і внутрішнє ядро (рис. 2).

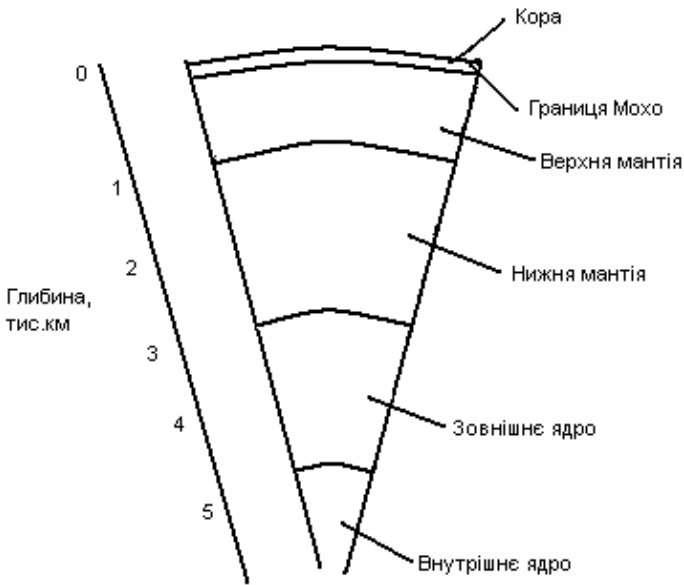


Рис. 2. Загальна схема внутрішньої будови Землі

Середня потужність зовнішньої твердої оболонки Землі (земної кори) 32 км, причому на континентах вона змінюється в межах 20...70 км, в океанах – 5...15 км. Глибше знаходиться верхня мантія, відділена від земної кори поверхнею розподілу Мохоровича (або, коротко, розділу Мохо) – сейсмічною межею, на якій швидкість подовжніх пружних хвиль  $V_p$  стрибкоподібно зростає до значень більше 8 км/с, тоді як в земній корі вона складає звичайно 6...7 км/с (максимальне значення 7,4 км/с).

Земна кора і верхня мантія утворюють так звану тектоносферу – область прояву в Землі тектонічних процесів.

У межах земної кори виділяють за сейсмологічними характеристиками три основні шари. Верхній – осадовий, характеризується швидкостями розповсюдження подовжніх пружних хвиль у межах 2,0...5,0 км/с. Його максимальна потужність звичайно не перевищує 10...15 км. Наступний шар має умовну назву гранітного, оскільки в ньому швидкість подовжніх хвиль  $V_p=5,5...6,0$  км/с. Максимальна потужність гранітного шару 30...40 км. Нижній шар земної кори, названий базальтовим, характеризується значенням  $V_p=6,5...7,4$  км/с. Його потужність 15...20 км. Гранітний і базальтовий шар розділені поверхнею Конрада – сейсмічною межею зміни швидкості пружних хвиль між цими двома шарами.

Отже, основна концепція сучасної механіки гірських порід полягає в тому, що напружений стан в цілому і верхньої її частини, визначається дією в земній корі двох незалежних силових полів. Одне з них – гравітаційне поле. Інше – тектонічне поле, обумовлене нерівномірним розподілом у просторі швидкості тектонічних рухів і швидкості деформацій земної кори.

Гравітаційне поле згідно закону всесвітнього тяжіння володіє такою особливістю, що воно не може бути відділене від матеріальних тіл, які його породили.

Тектонічне силове поле є значно складнішим, бо тектонічні рухи зумовлюють появу горизонтальних сил, які в сейсмології і геотектоніці оцінюють за максимальним дотичним напруженням. Досить суттєву інформацію про характер напруженого стану масиву порід можуть дати дані про вивалювання, які відбуваються відразу після відбою порід, раптових обвалах, поштовхах, стрілянні порід, які відбуваються під час проведення гірничо прохідних робіт.

Величина, яка характеризує інтенсивність розподілу внутрішніх сил, називається напруженням.

Навколо виробки утворюються поля напружень. Приймаючи до уваги гіпотезу про однорідність і безперервний розподіл речовини, виділимо в породному масиві, який знаходиться в рівновазі, довільну точку.

Напружений стан у точці може бути визначений заданням векторів напружень  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  в трьох взаємно перпендикулярних площинах, що проходять через цю точку (рис. 3).

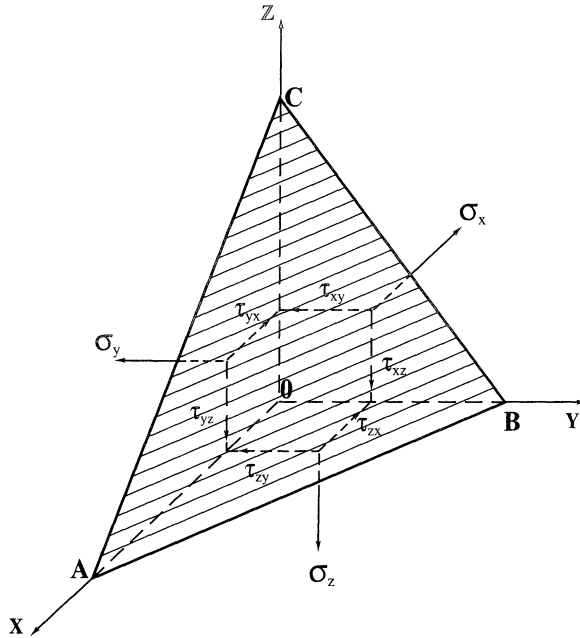


Рис. 3. Позначення компонентів напружень на косій довільно орієнтованій площині

Пересікаючись, ці площадки утворюють деяку прямокутну систему координат в якій ми маємо три компоненти нормального  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  і шість дотичних напружень –  $\tau_{yz}, \tau_{yx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ .

Знаючи величини і напрямки нормальних і дотичних напружень в трьох взаємно перпендикулярних площинах, які приймаються за координатні площини, можна знайти напруження в будь-якій площині, яка проходить через точку, що розглядається, якщо відомі напрямні косинуси  $l, m, n$  нормалі  $\nu$  до цієї площини відносно вибраних осей.

Отже, повне напруження  $P_\nu$  можна розкласти на складові, які паралельні координатним осям  $X_\nu, Y_\nu, Z_\nu$ . Тоді з умов рівноваги піраміди ABCO отримаємо наступні вирази:

$$\begin{aligned}
 X_\nu &= \sigma_x l + \tau_{xy} + \tau_{xz} n; \\
 Y_\nu &= \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n; \\
 Z_\nu &= \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Повне напруження  $P_v$  на нахиленій площині визначається наступним чином:

$$P_v = \sqrt{X_v^2 + Y_v^2 + Z_v^2}. \quad (3)$$

### Види напруженого стану

У загальному випадку напружено-деформований стан виділеного елементарного об'єму в колі даної точки характеризується наявністю дев'яти компонентів напружень і дев'яти компонентів деформацій. Такий напружено-деформований стан, називається об'ємним.

Вирішення об'ємних задач навіть тільки із застосуванням методів теорії пружності пов'язане із значними математичними труднощами. Тому вирішення будь-якої геомеханічної задачі починають з аналізу особливостей напружено-деформованого стану для того, щоб спростити початкову розрахункову схему і привести її по можливості до так званої плоскої задачі, коли всього лише два компоненти напружень і два компоненти деформацій залежать від координат точок тіла.

Так, наприклад, якщо тонку пластину, що знаходиться в стані рівноваги під дією зовнішніх сил, навантажити рівномірно розподіленими по товщині зусиллями, прикладеними до її границі паралельно площині пластини, то компоненти напружень  $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$  на обох поверхнях пластини будуть рівні нулю і можна припустити, що вони рівні нулю і всередині пластини (рис. 4).

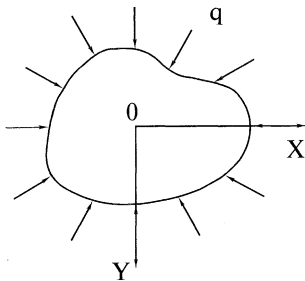


Рис. 4. Плоский напружений стан

Такий напружений стан визначатиметься тільки компонентами напружень  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  і називається плоским напруженим станом. Доведено, що в тонких пластинах всі три невідомі компоненти напружень не залежать від координати  $Z$ , а є тільки функціями координат  $X$  і  $Y$ .

Плоский напружений стан не є характерним для задач геомеханіки. Але спрощення, подібні приведеним вище, можливі і в іншому граничному випадку, коли розмір тіла у напрямку осі  $Z$  дуже

великий.



Це можуть бути, наприклад, підпірна стінка або довга горизонтальна виробка, лава і т.п. (рис. 5, а), б)). Якщо розглядається напружено-деформований стан масиву навколо виробки на достатній віддалі від її торців, то всі перетини, перпендикулярні поєздовжній осі виробки  $Z$ , знаходитимуться в однакових умовах.

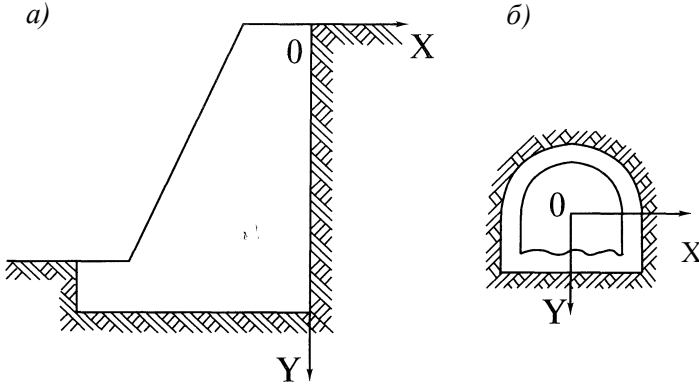


Рис. 5. Плоский деформований стан

Компоненти переміщень  $U$  і  $\eta$  не залежать від координати  $Z$  і є функціями координат  $X$  і  $Y$ . Поздовжні переміщення  $T$  при цьому рівні нулю. Такий напружений стан називається плоскою деформацією.

Співвідношення матиме вигляд:

$$\gamma_{yz} = \frac{dv}{dz} + \frac{d\omega}{dy} = 0, \quad \gamma_{xz} = \frac{du}{dz} + \frac{d\omega}{dx} = 0, \quad \varepsilon_z = \frac{d\omega}{dz} = 0. \quad (4)$$

### Граничні умови рівноваги

Рівняння рівноваги повинні задовольнятися в усіх точках досліджуваного тіла. При досягненні границі області компоненти напружень повинні бути такими, щоб вони знаходилися в рівновазі із зовнішніми силами, прикладеними до границі. Через це зовнішні сили можна розглядати, як продовження внутрішніх напружень.

Розглянемо малу трикутну призму, гіпотенуза якої співпадає з границею тіла (рис. 6). Позначимо через  $\bar{X}$  і  $\bar{Y}$  компоненти поверхневих сил  $P$ , віднесених до одиниці поверхні в цій точці границі. Рівняння рівноваги матимуть вигляд:

$$\bar{X} = l\sigma_x + m\tau_{xy}, \quad \bar{Y} = m\sigma_y + l\tau_{yx}, \quad (5)$$

де  $l, m$  – направляючі косинуси нормалі  $v$  до границі.

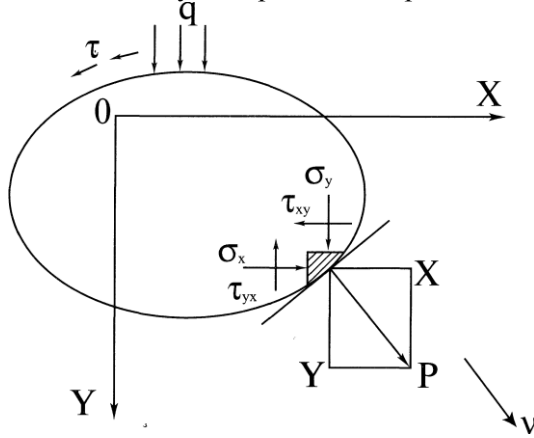


Рис.6. Для визначення граничних умов

В окремому випадку розгляду рівноваги прямокутної пластинки координатні осі за звичай направляють паралельно граням пластинки і граничні умови (5) можна спростити. Нехай, наприклад, одна із сторін пластинки паралельна осі  $X$ , тоді нормаль  $v$  на цій частині границі буде паралельна осі  $Y$ ; звідси  $l=0, m=1$ . Рівняння (5) у цьому випадку набудуть вигляду:

$$\bar{X} = \pm\tau_{xy}, \quad \bar{Y} = \pm\tau_{yx}; \quad (6)$$

причому знак (+) береться в тому випадку, якщо нормаль проведена у бік позитивних значень  $Y$ ; в протилежному випадку береться знак (-). З останніх формул видно, що компоненти напружень на границі рівні компонентам поверхневих зусиль, віднесених до одиниці площі границі.

## Тема 5. Лекція 8. МІЦНІСТЬ ГІРСЬКИХ ПОРІД У СКЛАДНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

### Розвиток уявлень про міцність і руйнування твердих тіл

Загальною властивістю практично всіх конструкційних матеріалів є їх твердість, яку слід розуміти, як здатність зберігати початкові розміри і цілісність при невеликих (не більш 1...3%) відносних

деформаціях. Гірські породи, якщо їх розглядати як матеріал, середовище, в якому проводиться виробка, також можна віднести до твердих тіл.

Проблема міцності і нерозривно пов'язане з нею явище руйнування твердих тіл існують з тих пір, коли, створюючи ту або іншу споруду, людина стала замислюватися над відповідністю її міцності витратам, пов'язаними з будівництвом. По цьому напрямку існують сотні книг і статей, у фізиці визначився самостійний напрямок – механіка руйнування .

Механічне руйнування внаслідок силової дії можна визначити, як результат деякої деформації і розриву структурних зв'язків матеріалу конструкції. Дослідження цього процесу, як і рішення будь-якої задачі, відбувається на основі фізичних моделей, що імітують реальні тверді тіла. Залежно від цілей дослідження вивченню і аналізу можна піддати порівняно невелику кількість моделей (рис. 1). До них відносяться структурні моделі, що розглядають тверді тіла на атомно-молекулярному рівні, і безструктурні, коли об'єкт вивчення представляється у вигляді суцільного однорідного тіла. Структурні моделі, як статичні, так і динамічні, вивчаються методами фізики твердого тіла; безструктурні – методами механіки суцільного середовища. Існують також комбіновані моделі, за допомогою яких середовище представляють як суцільне тіло, що складається з хаотично розташованих структурних елементів, що в свою чергу володіють мікроструктурою нижчого рівня. При цьому структурні елементи і на макро-, і на мікро рівні мають відмінні фізико-механічні характеристики. Вивчення таких моделей ведеться також на основі механіки суцільного середовища, але із залученням методів теорії ймовірності.

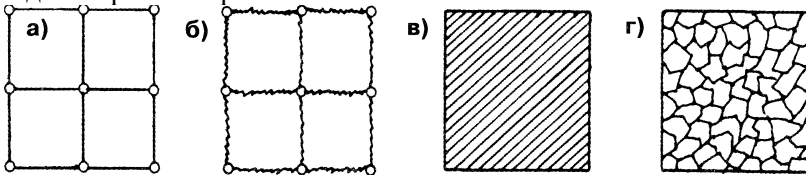


Рис. 1. Моделі твердого тіла: а) структурна, статична; б) структурна, динамічна; в) безструктурна; г) статистична

Рентгеноструктурні дослідження гірських порід дозволили достатньо точно встановити їх будову, відповідно до чого вони можуть бути розділені на кристалічні і аморфні. Причому, біль-

шість літологічних різновидів, у тому числі всі породи осадового типу, відносяться до групи полікристалічних твердих тіл.

Основною властивістю кристалічного стану речовини є геометрично правильне розташування частинок у просторі. Частинками можуть бути атоми, іони або молекули. Кристали мають будову так званих просторових ґраток, що є періодичним повторенням однієї і тієї ж групи частинок. Така група частинок утворює елементарну комірку, яка є початковою структурною одиницею.

Приймаючи, як основну структурну модель твердого тіла у вигляді ідеальної кристалічної ґратки, по кутах якої знаходяться частинки, що утримуються силами зв'язку, можна розрахувати величину зусилля, яке необхідне, щоб розірвати цей зв'язок і тим самим зруйнувати тіло, що деформується. Вперше цю задачу для крихких матеріалів вдалося вирішити А.А. Гриффітсу. Спираючись на аналітичні дослідження Г.В. Колосова і Інґліса, в яких розглядалася задача про розподіл напружень навколо еліптичних вирізів за заданих граничних умов, А.А. Гриффітс показав, що міцність крихких твердих тіл визначається міцністю на розрив структурних зв'язків, суттєво послаблених за рахунок мікрodefектів. Ці мікродефекти (тріщини), з різних причин, присутні в початковому матеріалі. В осадових породах, наприклад, їх наявність пов'язана з генезисом і подальшим метаморфізмом.

А.Ф. Іоффе, проводячи досліди з кам'яною сіллю, виходячи з припущень А.А. Гриффітса, встановив, що найбільш небезпечними є мікротріщини, розташовані на поверхні навантажуваного об'єкту. Розчиняючи ці дефекти у воді, йому вдалося одержати міцність на розрив кристалів кам'яної солі, близьку до теоретичної.

Свої висновки відносно послаблюючого впливу мікрodefектів на міцність твердих тіл А.А. Гриффітс втілює у теорію, що стала основою подальших досліджень в області так званих мікрodefектних теорій міцності.

Критерій, користуючись яким можна визначити, відбудеться або не відбудеться руйнування твердого тіла, має вигляд

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 8R_p(\sigma_3 + \sigma_1) = 0, \text{ якщо } 3\sigma_3 + \sigma_1 > 0. \quad (1)$$

$$\sigma_3 = R_p, \text{ якщо } 3\sigma_3 + \sigma_1 < 0. \quad (2)$$

Підставивши у вираз (1)  $\sigma_3=0$ , отримаємо співвідношення між

межею міцності на одновісне стиснення і межею міцності на одновісний розтяг:

$$R_c = -8R_p, \quad (3)$$

що досить добре узгоджується з дослідними даними для гірських порід.

Теорія міцності, розроблена А.А. Гриффітсом на початку 20-х років, цілком відповідає сучасним уявленням про механізм руйнування твердих тіл і досить добре узгоджується з дослідними даними. Саме з цієї причини їй надається так багато уваги в спеціальних дослідженнях, де вона одержала свій подальший розвиток.

### **Випробування гірських порід в складному напруженому стані**

Математичне моделювання механічних процесів, що розвиваються навколо гірських виробок під дією сил гравітації і неотектоніки, тим ближче відповідають дійсності, чим краще прийнята теорія міцності відображає природу і характер руйнування породного середовища. Аналіз сучасних уявлень про міцність твердих тіл показує, що єдиної теорії руйнування, придатної для практичного застосування, на даний момент немає, не дивлячись на численні аналітичні і експериментальні дослідження, що проводяться в цій області.

В інженерній практиці найбільшого поширення набули феноменологічні теорії міцності. Не розкриваючи причин, що лежать в основі процесу руйнування, вони достатньо добре відображають поведінку матеріалів при їх граничній деформації в складному напруженому стані. Інженерні теорії міцності не універсальні, вони слугують, в основному, для порівняно вузького класу випробуваних матеріалів у межах штучно створюваних напружених станів. Цим значною мірою пояснюється досить велика їх кількість: добре описуючи процес руйнування одних твердих тіл, вони непридатні для інших, відмінних за структурою.

Однією з найпоширеніших в механіці гірських порід є теорія міцності Мора і її модифікації, яка повністю базується на експериментальних даних. Дані одержують при випробуваннях зразків гірських порід в об'ємному напруженому стані. Один з приладів подібного роду був сконструйований Н. Карманом для перевірки

теорії міцності О. Мора. Прилад має наступну будову (рис. 2).

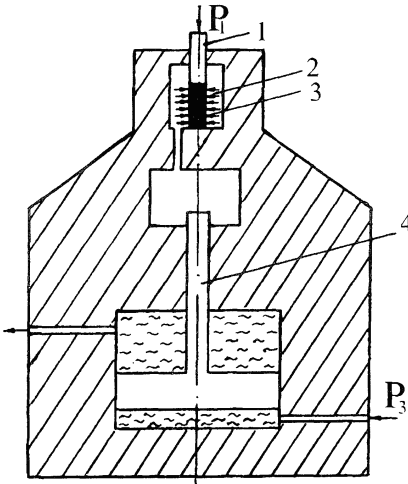


Рис. 2. Прилад Кармана: 1 – осьовий плунжер; 2 – зразок гірської породи; 3 – камера високого тиску; 4 – плунжер гідромультіплікатора

У камеру високого тиску (3) поміщають зразок гірської породи циліндричної форми (2), загорнутий алюмінієвою або мідною фольгою. Зусилля  $P_1$  передається осьовим плунжером (1) від пресу, на якому розміщують прилад. Зусилля  $P_3$  створюється масляним насосом за допомогою плунжера гідромультіплікатора (4). Таким чином, до торців зразка прикладене навантаження  $P_1$ , а до бокової поверхні –  $P_3$ . У зразку, відповідно, виникають напруження  $\sigma_1$  і  $\sigma_2 = \sigma_3$ .

Зразок доводять до руйнування і за наслідками випробувань будують так звані граничні

круги Мора (рис. 3.) в системі координат « $\tau - \sigma$ ».

Для цього, у самому загальному випадку, на осі відкладають нормальні напруження  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  та  $\sigma_3$  (рис. 3, а). На відрізках  $\sigma_1 - \sigma_3$ ,  $\sigma_2 - \sigma_3$  і  $\sigma_1 - \sigma_2$ , як на діаметрах, будують граничні для даного напруженого стану круги Мора.

Прилад Кармана дозволяє моделювати об'ємний напружений стан з наступними компонентами напружень:  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . Подальші експерименти на подібних приладах, дозволяючи вже реалізувати схему навантаження зразка кубічної форми, коли  $P_1 \neq P_2 \neq P_3$  дозволили довести, що вплив проміжного за величиною навантаження  $\sigma_2$  не перевищує 10% і знаходиться в межах точності вимірювань. Таким чином, міцність гірських порід визначається, перш за все різницею найбільшого і найменшого напружень.

Граничні круги Мора, побудовані для випадку, коли виконується

умова  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  показані на рис. 3, а. Такі круги, що міняють величину головних напружень, можна побудувати досить багато. З'єднуючи круги плавною кривою, одержують згинаючу  $\tau = f(\sigma)$ , яка розділяє область небезпечних (вище кривої) і безпечних (нижче кривої) станів. Таку криву часто називають паспортом міцності матеріалу. Вона показана на рис. 3, б.

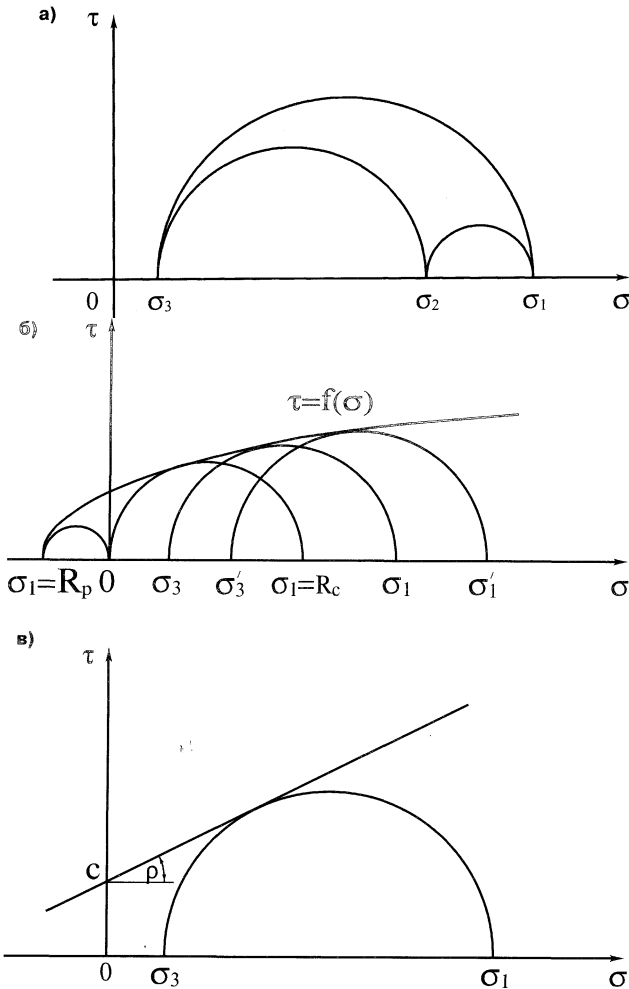


Рис.3. Графічна інтерпретація об'ємного напруженого стану: а) вплив величини  $\sigma_2$ ; б) криволінійна огинаюча кругів Мора; в) прямолінійна огинаюча кругів Мора

У ході експериментів Н. Карман підтвердив можливість практичного використання теорії міцності О. Мора і довів високу її надійність.

Для вирішення пружно-пластичних задач огинаючих граничних кругів у теорії міцності О. Мора необхідно апроксимувати деяким рівнянням. Такі описи є у вигляді гіперболи, експоненти, циклоїди.

Нерідко криволінійну огинаючу замінюють прямолінійною, яка на осі  $\tau$  відсікає відрізок, рівний  $C$ , і нахилена до осі  $\sigma$  під кутом  $\rho$ , рівним величині кута внутрішнього тертя (рис. 3, в). Слід зазначити, що заміна криволінійної огинаючої прямої є грубим спрощенням, що не має під собою фізичного обґрунтування.

### **Теорія руйнування гірських порід у складному напруженому стані**

Передумова про малий вплив проміжного по величині напруження на руйнування гірських порід є єдиною в теорії Мора, яка в основному не вимагає перевірки, оскільки цілком ґрунтується на експериментальних даних. Однак, аналітичний критерій міцності отримується шляхом підбору відповідного емпіричного виразу і його застосування обмежується власне кажучи тією областю напружених станів, у якій виконані експерименти.

Таким чином, експериментальний характер забезпечує досить точний опис граничного стану матеріалу, емпіричний же підбір умови міцності не дає можливості повною мірою скористатися цією перевагою. Тому цікавим є висновок аналітичного критерію теорії на основі аналізу процесу руйнування в локальній області твердого тіла, що може бути представлений наступним способом. Дотичні напруження, величина яких досить повно характеризується інтенсивністю напружень  $\sigma_i$ , розпушують матеріал шляхом здвигання, а під дією нормальних напружень, рівень яких визначається кульковим тензором  $I$ , відбувається розкриття тріщин.

Ряд сучасних теорій міцності був отриманий на основі моделі руйнування твердих тіл із загальної функціональної залежності, яка об'єднує в одне співвідношення інтенсивності напружень і компоненти шарового тензора  $I$ :

$$\sigma_i^2 + aI^2 + bI = c, \quad (5)$$



де  $a, b, c$  – деякі параметри, визначені з випробувань при найпростіших напружених станах:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (6)$$

$$I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3. \quad (7)$$

Наступна гіпотеза Мора, припустимо, що міцність матеріалу практично залежить тільки від тих членів рівняння (6) і (7), які визначають різницю і суму найбільшого і найменшого компонентів напружень. Тоді з (5) при  $\alpha = 0$ , отримаємо наступний вираз:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + b(\sigma_1 + \sigma_3) = c. \quad (8)$$

Параметри  $b$  і  $c$  визначимо з (8) у результаті вимірювань гірських порід при найпростіших напружених станах: при одновісному стисненні отримаємо

$$\frac{1}{2}R_c^2 + bR_c = c; \quad (9)$$

при одновісному розтягуванні

$$\frac{1}{2}R_p^2 - bR_p = c. \quad (10)$$

Розв'язуючи рівняння (9) і (10) отримаємо:

$$b = \frac{1}{2}R_c(\psi - I); \quad c = \frac{1}{2}R_c^2\psi, \quad \text{де } \psi = \frac{R_p}{R_c}. \quad (11)$$

Підставивши значення параметрів (11) у відношенні (8), отримаємо наступну умову міцності:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - R_c^2\psi - (1 - \psi)R_c(\sigma_1 + \sigma_3) = 0, \quad (12)$$

або в загальному вигляді напруженого стану:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 - R_c^2\psi - (1 - \psi)R_c(\sigma_x + \sigma_y) = 0. \quad (13)$$

З рівняння (12) отримаємо:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k, \quad (14)$$

де

$$k = 0,5\sqrt{R_c^2\psi + (1-\psi)R_c(\sigma_1 + \sigma_2)}. \quad (15)$$

Відмітимо, що при осесиметричному розподіленні напружень  $\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_r + \sigma_\theta = const$ . Звідси слідує, що вираз (14) є умовою міцності Треска-Сен-Венана. В загальному ж випадку напруженого стану перша частина умови (14) залежить від значень компонентів напруження.

Для матеріалів, які однаково протидіють стисненню і розтягу,  $\psi = 1$ . У цьому випадку із виразу (14) отримаємо теорію Кулона.

При  $\psi = 0$  із (12) отримаємо наступний частковий вираз теорії міцності:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{R_c(\sigma_1 + \sigma_3)}. \quad (16)$$

Позначимо відповідно максимальне дотичне напруження і величину, яка характеризує вид напруженого стану, як  $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$  і  $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ . Тоді вираз (12) з урахуванням прийнятих позначень набуде вигляду:

$$4\tau^2 - 2\sigma(1-\psi)R_c - R_c^2\psi = 0. \quad (17)$$

Залежність (17) в системі координат « $\tau - \sigma$ » являє рівняння параболи, що є опуклою і безперервною кривою.

У системі координат « $\sigma_1 - \sigma_3$ » рівняння (12) має вигляд параболи, рівно нахиленої до осей і відкритої зі сторони стискаючих напружень, що відповідає вимозі симетричності умови виникнення граничного напруженого стану (рис.4). Із збільшенням величини  $\psi$  від 0 до 1 парабола витягається в сторону всебічного розтягання, що підтверджується дослідами Г.В. Ужика. І при  $\psi = 1$  парабола перетворюється в дві рівнобіжні прямі, які відповідають теорії «енергії формозміни».

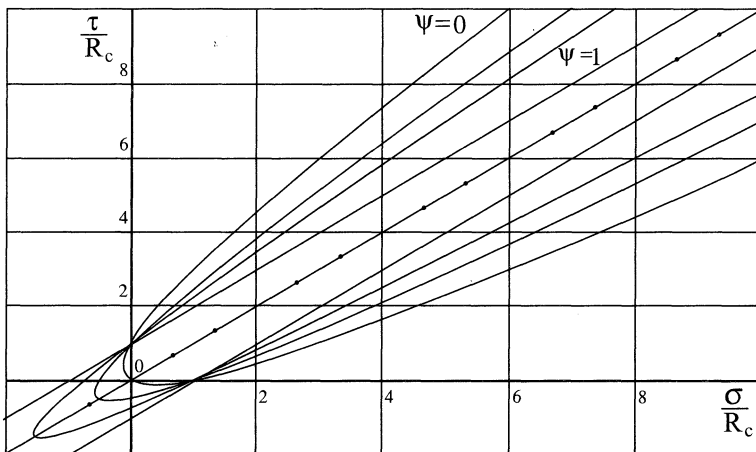


Рис. 4. Поверхні граничних станів за формулою (3.17)

Таким чином, отримана умова міцності відповідає вимогам постулату Друккера і відповідає сучасним уявленням про природу руйнування твердих тіл.

Руйнування крихких матеріалів досить добре описується теорією Гриффітса. Муррель показав, що в системі координат « $\tau - \sigma$ » основне рівняння теорії Гриффітса може бути представлене наступним чином:

$$4\tau^2 - 2R_c\sigma - 0,25R_c^2 = 0. \quad (18)$$

Якщо в залежність (17) підставити, згідно Гриффітсу,  $\psi=1/8$  і порівняти її з залежністю (18), то виявиться, що аналітичні вирази двох теорій міцності, отримані на основі різних фізичних представлень про природу руйнування, є практично ідентичними.

Умова міцності (12) при  $\psi=1$  була перевірена Баушингером, який показав, що вона добре описує процес руйнування пластичних матеріалів.

На рис. 5 і рис. 6 показана теоретична крива залежності (12) у системі безрозмірних координат ( $X = \frac{\sigma_1}{R_c}$ ;  $Y = \frac{\sigma_3}{R_c}$ ) і результати випробувань гірських порід, одержані А.Н. Ставрогіним і Х. Куком.

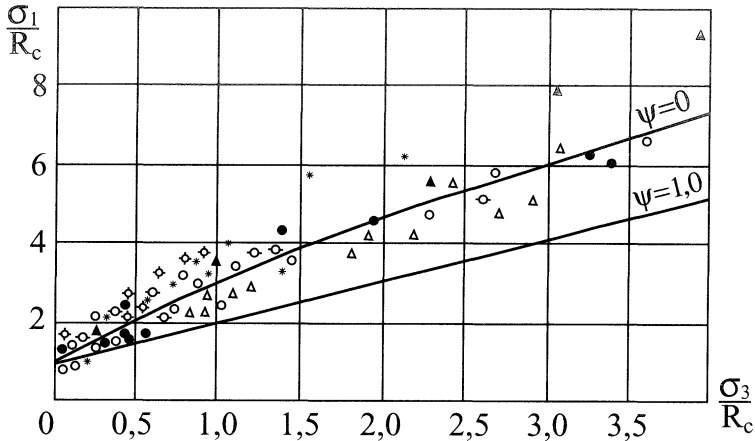


Рис. 5. Порівняння аналітичного критерію (12) з результатами іспитів гірських порід і бетону: о – вапняк,  $\Delta$  – аргіліт,  $\blacktriangle$  – талькохлорит, -о- – мрамур 1, + – діабаз, \* – діорит,  $\odot$  – алевроліт Д-19, піщаник Д-12,  $\bullet$  – бетон.

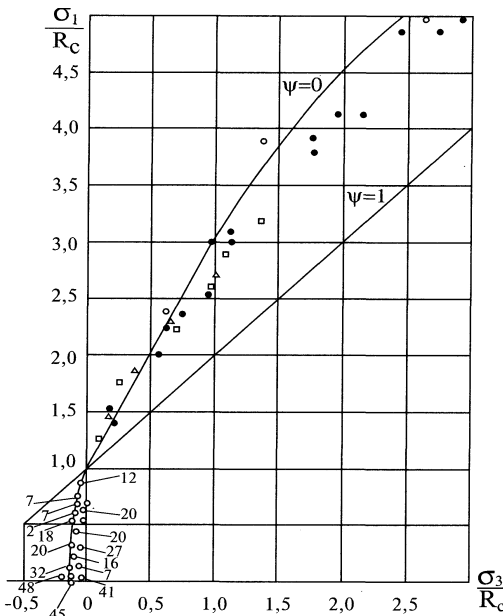


Рис. 6. Порівняння аналітичного критерію (12) з результатами випробувань гірських порід

Незважаючи на деяке наявне розкидання експериментальних точок, немінуче при випробуваннях структурно неоднорідних матеріалів, якими є гірські породи і бетони, з рисунків випливає, що запропонована умова міцності (12) досить добре описує процес їхнього руйнування при об'ємному стисканні і стисканні з розтягом.

Із виразу (12) може бути отримана формула для приведення складного напруженого стану до простого одноосного. Вона має наступний

вигляд:

$$\sigma_e = \frac{(1-\psi)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3) + 4\psi(\sigma_1 + \sigma_3)^2}}{2\psi} \leq R_c, \quad (19)$$

де  $\sigma_e$  – еквівалентне напруження, тобто напруження, подібне до вісного напруженому стану.

Використовуючи формулу (19) можна за допомогою коефіцієнта запасу міцності  $n$  оцінити ступінь небезпеки руйнування породного середовища для будь-якої точки однорідного породного масиву в околиці виробки, порівнюючи величину  $\sigma_e$  з межею міцності на одновісне стиснення  $R_c$ :

$$n = \frac{R_c}{\sigma_e}. \quad (20)$$

## **Тема 6. Лекція 9. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОРОДНИХ МАСИВІВ**

### **Початковий напружений стан зв'язних породних масивів**

Основним, чи первинним, фактором, завдяки якому створюється початкове поле напружень, є сили гравітації. Крім цього параметри початкового поля напружень залежать від ряду вторинних факторів, таких як температурне поле, неотектонічні процеси, рельєф земної поверхні, космічні сили. При цьому може статися так, що вплив вторинних факторів перевищить вплив первинних. Для рівнинних родовищ, розташованих поза впливом гірських масивів і на достатній віддалі від країв літосферних плит, вплив вторинних факторів досить малий і можна стверджувати, що початкове поле напружень створюється завдяки наявності сил гравітації.

Існує багато гіпотез, які служать підставою для визначення компонентів початкового поля напружень. Найбільшого поширення з них одержала гіпотеза академіка А.Н. Динника.

Розглянемо досить малий об'єм породного масиву у формі куба зі стороною, рівною одиниці, що знаходиться на глибині  $H$  від поверхні землі (рис. 1.). Об'ємна вага порід, що залягають вище, дорівнює  $\gamma$ .

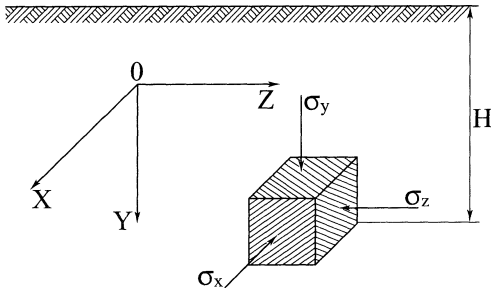


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення початкового напруженого стану породного масиву

У пружному масиві горизонтальні і вертикальні напруження зв'язані співвідношенням:

$$\sigma_x = \sigma_z = \lambda \gamma H, \quad (1)$$

де  $\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ,

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона для гірських порід,  $\lambda$  – коефіцієнт Динника.

Величина коефіцієнта Пуассона для твердих гірських порід коливається в межах 0,15...0,30. Відповідно до цього коефіцієнт Динника дорівнює 0,2...0,45.

Напруження в товщині земної кори сформувалися мільйони років тому. Багато дослідників цілком обгрунтовано думають, що за геологічний час напруження в породному масиві вирівнялися (релаксували), тобто  $\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y$ . Такий напружений стан називається гідростатичним. Гіпотеза про гідростатичний розподіл напружень вперше була висунута А. Геймом.

Інструментальні дослідження, виконані ВНИМИ для похило залягаючих родовищ осадового походження, підтвердили цю гіпотезу.

Таким чином, можна стверджувати, що на рівнинних родовищах при відсутності впливу неотектонічних процесів напружений стан близький до гідростатичного. В інших же випадках він являється нерівно компонентним, причому співвідношення між горизонтальною і вертикальною складовою можуть бути більшими за одиницю.

Одночасно великі дослідження природних напружених полів були виконані вченими з Австрії, Норвегії, Швеції, Фінляндії, Канади, США, ПАР та з інших країн. Накопичені за останні роки статистичні матеріали про природне поле напружень підтверджують основні особливості у розподілі напружень у верхній частині земної кори.

### **Початковий напружений стан сипучих породних масивів**

Оцінка напруженого стану масиву сипучих порід вперше була

дана Кулоном. Сутність методу полягає у наступному. Уявно розсічемо масив площиною  $ab$  до глибини  $H$ , відкинемо ліву частину масиву й замінимо дію відкинutoї частини силою  $D$  (рис. 2).

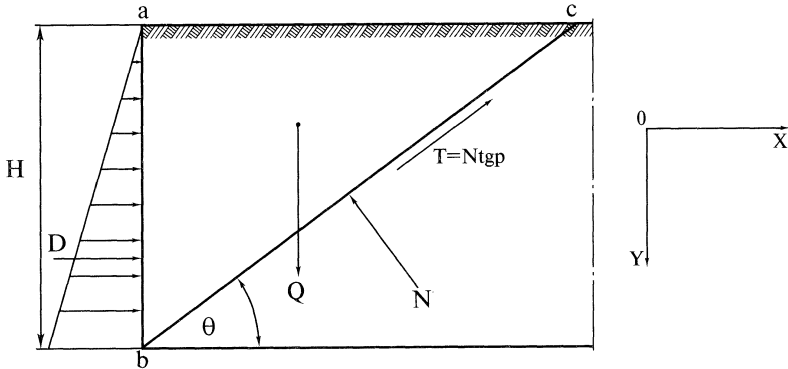


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення початкового поля напружень в сипучому середовищі

Розглянемо рівновагу призми  $abc$  на довжині, рівній  $l$ . Призма під дією сил власної ваги  $Q$  прагне сповзти вниз по лінії  $bc$  під кутом  $\theta$  до горизонту. Реактивними силами, що перешкоджають ковзанню, є сила  $D$ , сила тертя по площині ковзання  $T$  і нормальна реакція  $N$ .

Проектуючи всі сили на вісь  $Y$  і  $X$ , прирівнюючи їх до нуля, отримаємо:

$$D = Q \operatorname{tg}(\theta - \rho), \quad (2)$$

де  $\rho$  – кут внутрішнього тертя сипучого середовища.

Враховуючи, що:

$$Q = \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{tg}(90^\circ - \theta); \quad (3)$$

отримаємо:

$$D = \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{tg}(90^\circ - \theta) \operatorname{tg}(\theta - \rho). \quad (4)$$

Дослідимо величину  $D$  на максимум:

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ \frac{\operatorname{tg}(90^\circ - \theta)}{\cos^2(\theta - \rho)} - \frac{\operatorname{tg}(\theta - \rho)}{\cos^2(90^\circ - \theta)} \right] = 0, \quad (5)$$

звідки:

$$\frac{\operatorname{tg}(90^\circ - \theta)}{\cos^2(\theta - \rho)} = \frac{\operatorname{tg}(\theta - \rho)}{\cos^2(90^\circ - \theta)} \quad (6)$$

або  $90^\circ - \theta = \theta - \rho$ .

Підставляючи значення  $\theta$  в (4), отримаємо:

$$D = \frac{1}{2} \gamma H^2 \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right) \quad (7)$$

Для визначення горизонтальної складової напружень  $\sigma_x = \sigma_z$  скористаємось наступною формулою:

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{dD}{dH} = \gamma H \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right). \quad (8)$$

Величина  $\operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right)$  називається коефіцієнтом бічного розпору для сипучого середовища.

### **Характерні особливості прояву гірського тиску та задачі управління ним в очисних виробках**

Виробки, утворені в результаті безпосередньої виймки корисної копалини при її розробці, називають очисними. В порівнянні з підготовчими і капітальними, очисні виробки мають деякі особливості. Найважливішими з них є значно більші розміри поперечних перерізів, безперервний рух вибою, що зумовлює постійну зміну поля статичних напруг навколо виробки, а також істотно менший час експлуатації. Ці особливості очисних виробок визначають в свою чергу і специфічні прояви гірського тиску в них.

При певних умовах в очисних виробках проявляється особливий



вид деформування гірських порід – вздуття породи. Природа набування різна: іноді вона відбувається в результаті видавлювання з ґрунту пластичних порід під впливом опорного тиску, що розвивається в боках виробок, часом – внаслідок збільшення обсягу глинистих порід і зменшення їхньої міцності під впливом води. Найчастіше ці фактори діють спільно.

Широко розповсюдженим видом проявів гірського тиску в очисних виробках є також обвалення порід при досягненні деяких критичних розмірів.

Для керування гірським тиском в очисних виробках іноді використовують закладку з порожньої породи, що підтримує кривлю очисних просторів чи зменшує амплітуду зсуву покриваючих порід. Аналогічну роль відіграє відбита гірська маса, магазинована в блоках при розробці крутопадаючих рудних покладів. Роблячи протитиск на стінки очисних камер, замагазинована руда і порода істотно змінюють умови деформування масиву порід в при контурній області навколо очисних просторів.

### **Прояви гірського тиску в очисних виробках при різних системах розробки вугільних і рудних родовищ**

Форми і характер проявів гірського тиску в очисних виробках дуже різноманітні (від невеликих зрушень і деформацій гірських порід і корисної копалини до їхнього руйнування й обвалення, від незначних навантажень на кріплення до повного виведення її з ладу) і залежать від багатьох факторів, у тому числі від глибини розробки, структури і механічних властивостей гірських порід, потужності і кута падіння корисної копалини. Великий вплив на прояви гірського тиску роблять виробничо-технічні умови експлуатації родовищ, що характеризуються формою, розмірами і розташуванням виробок, технологією ведення видобувних робіт, способом керування гірським тиском, видом кріплення. Разом з тим із схильністю порід до того чи іншого виду деформування зв'язаний вибір систем розробки родовищ і встановлення оптимальних параметрів цих систем.

Загальна картина процесів, що відбуваються в масиві порід навколо очисної виробки, полягає в зміні поля статичних напружень і, як наслідок цього, у деформуванні навколишніх порід. У першу чергу на контурі виробленого простору й у навколишньому

масиві порід відбуваються пружні зсуви. У деяких, правда дуже нечисленних, випадках зазначеними пружними зсувами процеси деформування масиву порід і вичерпуються. Однак це може мати місце лише при дуже міцних породах і високому ступені монолітного масиву, зокрема при розробці деяких рудних родовищ системами з відкритим очисним простором, наприклад камерними і камерно-стовповими системами.

Набагато частіше у виробленому просторі слідом за пружними зсувами порід покрівлі і стінок розвиваються не пружні деформації і відбуваються локальні руйнування. Цьому сприяє розвиток у навколишньому масиві зон концентрації як стискаючих, так і розтягуючих напружень. У процесі деформування втягуються великі об'єми порід, внаслідок чого в очисних виробках розвиваються процеси обвалення покриваючих порід.

У практиці розробки пластових родовищ твердо вкоренилися поняття безпосередньої й основної кривлі і ґрунту шарів, що відображають різну здатність порід до обвалення над очисним простором.

Безпосередньою кривлею називають маломіцний шар порід, що залягає безпосередньо над пластом і не зберігає, як правило, стійкість у при забійному просторі без кріплення чи ціликів.

Основну кривлю складають більш міцні шари порід, що залягають над безпосередньою кривлею, які починають рухатися через деякий час після обвалення безпосередньої кривлі, коли площа очисної виїмки досягає відповідних критичних розмірів (рис. 3).

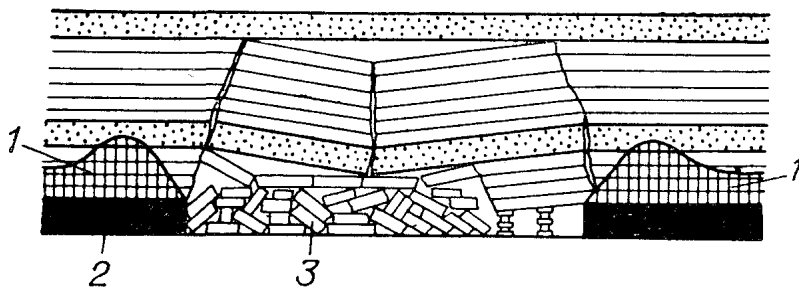


Рис.3. Руйнування основної кривлі над очисною виробкою: 1 – епюри опорного тиску; 2 – вугільний пласт; 3 – вироблений простір

Аналогічно поділу порід кривлі виділяють також безпосередній і основний ґрунт. Безпосередній ґрунт – шар порід, що залягає безпо-

середньо під пластом чи покладом. З його властивостями пов'язані явища взуття, сповзання при крутому падінні і вдавлення в нього ціликів чи кріплення. Товщу порід, що залягає нижче безпосереднього ґрунту, називають *основним ґрунтом*.

Магматичні родовища в порівнянні з осадовими відрізняються більш складною структурою. Внаслідок цього форми і розміри вивалів і обвалень тут більш різноманітні.

В умовах крутопадаючих і похилих родовищ при високому рівні статичних напружень у масиві порід, зокрема на великих глибинах, руйнування не тільки можуть мати місце в кривлі очисного простору і у висячому боці, але захоплювати і лежачий бік. Подібні явища, наприклад, мають місце при розробці залізородних покладів Криворізького басейну і вугільних шарів у центральному районі Донбасу.

У певних умовах при виконанні очисних робіт системами розробки з магазиніруванням функції закладочного матеріалу виконує також не випущена руда у блоках, що відпрацьовуються.

При камерних системах розробки гірський тиск проявляється в деформуванні (а іноді й у руйнуванні) ціликів, вдавненні їх в ґрунт, у прогині кривлі й здуванні ґрунту. При несприятливих умовах у ґрунті і кривлі камер можуть з'явитися тріщини, що приводять до завалу камер.

До числа проявів гірського тиску в очисних виробках відносяться також заколи, осипання і стріляння порід, гірські удари, для боротьби з якими приходиться застосовувати цілий комплекс мір.

### **Напружено-деформований стан порід навколо очисної виробки. Зони опорного тиску і розвантаження**

У міру видобутку корисної копалини і переміщення вибою поле напружень навколо очисної виробки змінюється. Область масиву, в межах якої відбуваються ці зміни, називають *зоною впливу очисної виробки*. На відміну від підготовчих виробок зони впливу навколо очисних просторів охоплюють значно більші області масиву. Нерідко процеси захоплюють всю товщу вище лежачих порід аж до денної поверхні. Значні області масиву втягуються в процеси деформування також і з боку ґрунту очисної виробки.

За ступенем і характером процесів деформування і переміщення порід у межах впливу очисної виробки в масиві можуть бути виділені декілька зон: *зона обвалів, зона тріщин, зона плавного*

прогину, зона зрушень.

З точки зору напружень у масиві порід навколо очисної виробки виділяють дві характерні зони: *зону розвантаження* і *зону опорного тиску*. Перша характеризується тим, що в її межах породи зазнають менших навантажень, ніж до проведеної очисної виїмки. Область, де напруження перевищують рівень початкового поля напружень, носить назву зони опорного тиску.

Слід відмітити, що оскільки межі очисної виробки увесь час переміщуються в просторі, то виділені зони також знаходяться в безперервному русі, та породи масиву, зазнаючи зміни стану, постійно переходять з однієї зони в іншу.

У зв'язку з безперервним рухом вибою очисної виробки на практиці прийнято виділяти тимчасовий і опорний тиск, який виникає поблизу меж очисного простору.

Параметри зони опорного тиску визначаються багатьма факторами. У першу чергу до них слід віднести параметри початкового поля напружень, розміри і конфігурацію очисних просторів, деформаційно-міцнісні властивості масиву вміщуючих порід, а також метод впливу на вугільний пласт чи рудне тіло.

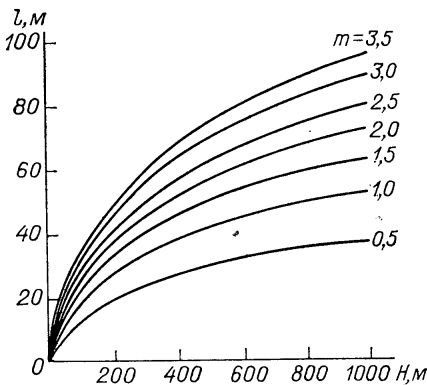


Рис. 4. Залежність ширини  $l$  зони опорного тиску від глибини залягання очисних виробок  $H$  і від міцності пласта  $m$

На рис. 4. представлено залежності ширини зони опорного тиску від глибини закладання очисної виробки і від міцності пласта в умовах вугільних родовищ.

## Тема 7. Лекція 10. ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КРІПЛЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВИРОБОК

Основним елементом, що забезпечує безпеку працюючих під землею людей, є гірське кріплення. Розрахунок кріплення зводиться, як правило, до визначення або його товщини, або типо-

розміру прокатного профілю і кількості рам, встановлюваних на 1 м виробки. Задача визначення навантаження на кріплення гірських виробок є однією з основних в механіці гірських порід.

Відома велика кількість гіпотез, на основі яких виконуються дослідження, кінцевою метою яких є теорія гірського тиску і, як наслідок, методики оцінки тиску гірських порід на кріплення протяжних виробок. Кожна гіпотеза претендує на універсальність рішення, однак практика показує, що в кращому випадку можна говорити лише про деякий діапазон гірничо-геологічних умов у межах якого виправдується та чи інша вихідна передумова. Це пов'язано з великою складністю і різноманітністю факторів, що впливають на характер проявів гірського тиску

### Гіпотеза зводу природної рівноваги

Утворення зводів при обваленні кривлі виробок, що спостерігається на практиці, стало основою для теоретичних розробок з метою визначення навантаження на кріплення. Великі дослідження у цьому напрямку були виконані М.М. Протод'яконовим, П.М. Цимбаревичем, Н.П. Покровським.

*Теорія М.М. Протод'яконова.* На глибині  $H$  від поверхні розглядається горизонтальне довге вироблення з перерізом прямокутної форми шириною  $2a$  (рис. 1, а). Над виробленням відповідно до гіпотези утвориться зведення природної рівноваги висотою  $b$ . Породи в межах зводу цілком зруйновані, не мають зчеплення, але мають внутрішнє тертя. Зведення кріплення у виробці не перешкоджає утворенню зводу природної рівноваги.

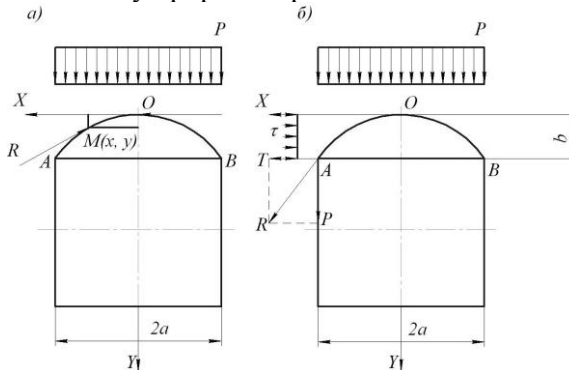


Рис. 1. Схема для розрахунку навантаження на кріплення за М.М. Протод'яконовим

Задача складається з двох частин: 1) визначення форми кривої зводу; 2) визначення його висоти.

Для вирішення першої частини задачі помістимо початок координат у ключ зводу і розглянемо рівновагу дуги  $OM$ . Відкинуті частини зводу  $OB$  і  $AM$  замінимо реактивними силами  $T$  і  $R$ . Оскільки розглядається середовище без зчеплення, сили  $T$  і  $R$  спрямовані по дотичним до кривої зводу рівноваги.

Взявши суму моментів відносно точки  $M$ , отримаємо:

$$T_y - \frac{px^2}{2} = 0. \quad (1)$$

де  $T$  – горизонтальна складова опорного тиску.

Звідки випливає рівняння кривої  $y = \frac{px^2}{2T}$ , яка є параболою.

Таким чином, висота зводу природної рівноваги дорівнює частці від ділення напівпроблиту вироблення на коефіцієнт тертя  $b = \frac{a}{f}$ .

Це основний висновок з теорії М.М. Протодяконова. Для використання отриманих залежностей у зв'язних породах, за М.М. Протодяконовим, досить замінити величину  $f$  коефіцієнтом міцності тої чи іншої породи.

Вага порід, що тисне на кріплення на довжині 1 м виробки, визначається з умови:

$$Q = \frac{2}{3} 2ab\gamma = \frac{4}{3} \gamma \frac{a^2}{f}, \quad \text{кН} \quad (2)$$

Тиск на одну раму при кроці  $l$  установки кріплення

$$Q_l = \frac{4}{3} \gamma \frac{a^2}{f} l, \quad \text{кН}. \quad (3)$$

Як впливає з формул (2) і (3), тиск на кріплення виробки не залежить від глибини розташування її від поверхні землі. Фактичного ж вимірювання величини тиску на кріплення виробок показують, що з глибиною тиск на кріплення зростає по деякому нелінійному закону. Крім того, руйнування вм'ячуючих порід, має

місце не тільки в кривлі, але й у боках виробки і навіть у ґрунті. У зв'язку з цим теорія гірського тиску М.М. Протодьяконова придатна для розрахунків навантаження на кріплення при невеликих (до 70...100 м) глибинах розробки.

*Теорія П.М. Цимбаревича.* Очевидна невідповідність уявлень М.М. Протодьяконова реальним процесам формування навантаження на кріплення гірських виробок спонукала П.М. Цимбаревича запропонувати нову, більш сучасну на той час, теорію гірського тиску.

Відповідно до його уявлень у кривлі виробки утворюється звід природного руйнування, розміри якого виходять за межі виробки на величину  $2c$  (рис. 2). При цьому проліт нового зводу дорівнює  $2a+2c$ .

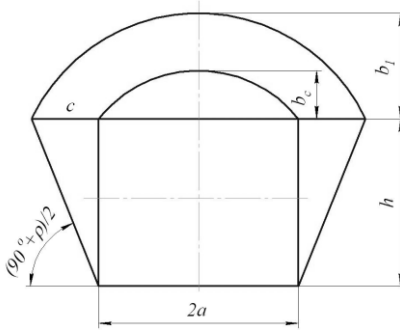


Рис. 2. Розрахункова схема до задачі П.М. Цимбаревича

Породи під опорами зводу руйнуються, у боках вироблення утворюються призми, які створюють бічний тиск на стійки кріплення.

Висота призм сповзання дорівнює висоті вироблення  $h$ , а кут нахилу площин сповзання

дорівнює  $\frac{90^\circ + \rho}{2}$ , де  $\rho$  – кут

внутрішнього тертя вміщуючих порід. У відповідності із схемою отримаємо:

$$c = h \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + \rho}{2}. \quad (4)$$

Тоді

$$b_1 = \frac{a+c}{f} = \frac{a + h \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + \rho}{2}}{\operatorname{tg} \rho}. \quad (5)$$

При розрахунку поверхні кріплення вертикальне навантаження приймають рівномірно розподіленим:

$$Q = 2ab_1\gamma. \quad (6)$$

Як бачимо з формули (6), тиск на кріплення також не залежить від глибини закладення виробки.

### Гіпотеза взаємодії кріплення і породного масиву

П.М. Цимбаревич один із перших звернув увагу на взаємозв'язок між навантаженням на кріплення гірських виробок і величиною його піддатливості. У 1948 році ним була опублікована праця, в якій вперше були сформовані положення так званої енергетичної теорії гірського тиску. Суть теорії, заснованої на законах термодинаміки, зводиться до наступного. Після того як у виробці встановлюється кріплення, утворюється замкнута система, яка володіє певною внутрішньою енергією  $S$ . З часом відбувається перерозподіл енергії в системі, який може призвести як до рівноваги, так і до руйнування кріплення.

Найбільш відомі дослідження в цьому напрямку належать А.Лабассу, Р.Феннеру.

*Теорія А.Лабасса.* У праці А.Лабасса розглядається довга горизонтальна виробка, яка має круглий обрис поперечного перерізу з радіусом  $R_o$  і розміщена на глибині  $H$  від земної поверхні в однорідному породному масиві з об'ємною вагою  $\gamma$ . До контуру виробки прикладене рівномірно розподілене навантаження величиною  $P_o$ . Рівень напружень, який діє у місці виробки, такий, що навколо нього утворюється замкнена область зручованих порід, яка розглядається як середовище, в якому відсутнє зчеплення і яке володіє внутрішнім тертям. Розрахункова схема задачі відповідає рис. 3.

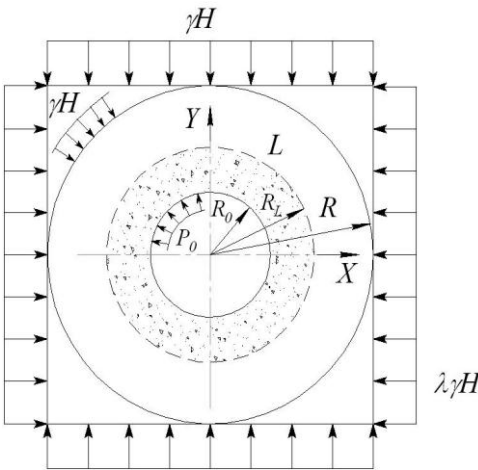


Рис. 3. Розрахункова схема для розв'язку задачі про пружно-пластичний розподіл напружень навколо горизонтальної виробки

Рівняння рівноваги і



умови міцності для області непружних деформацій мають вигляд:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0, \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = A\sigma_r, \quad (8)$$

де  $A = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}$ .

Підставивши значення  $\sigma_\theta$  із (8) в (7), отримаємо наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - (A-1)\frac{\sigma_r}{r} = 0, \quad (9)$$

розв'язок якого має вигляд:

$$\sigma_r = C \cdot r^{A-1}, \quad (10)$$

де  $C$  – довільна постійна інтегрування, яку знайдемо із граничної умови на контурі виробки:

$$\sigma_r = p_0 g \text{ при } r = 1. \quad (11)$$

У кінцевому випадку отримаємо:

$$\sigma_r = p_0 r^{A-1}; \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = A p_0 r^{A-1}. \quad (13)$$

Умови спільності деформацій для розглядуваної полярно-симетричної задачі наступні:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = 2\mathcal{H}. \quad (14)$$

Підставляючи значення компонентів напружень (12) і (13), отримаємо при  $r = r_L$  розрахункову формулу для визначення навантаження на кріплення виробки

$$p_0 = (1 - \sin \rho) \gamma H \left( \frac{R_0}{R_L} \right)^{\frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho}}, \quad (15)$$

де  $R_L$  – радіус області не пружних деформацій.

У результаті непружного розширення порід в пластичній області площа поперечного перерізу зменшується на величину  $\Delta S$ , яка за А.Лабасом може бути визначена за формулою:

$$\Delta S = \pi (R_L^2 - R_0^2) (k_p - 1), \quad (16)$$

Із (16) отримаємо вираз для визначення радіуса зони непружних деформацій:

$$R_L = \sqrt{\frac{\pi R_0^2 (k_p - 1) + \Delta S}{\pi (k_p - 1)}}. \quad (17)$$

Величина піддатливості  $\Delta S$  по конструктивним міркуванням приймається рівною  $(0,16-0,26)S_{cв}$  ( $S_{cв}$  – площа поперечного перерізу виробки), коефіцієнт роз рихлення  $k_p=1,1$ .

### Гіпотеза зводоутворення в умовах взаємодії кріплення з породним контуром

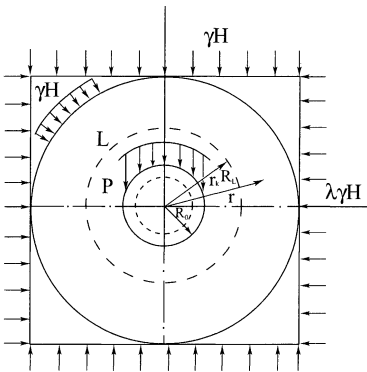


Рис. 4. Для визначення навантаження на піддатливе кріплення горизонтальної виробки (за Ю.М. Ліберманом)

Дослідженням цієї проблеми займався Ю.М. Ліберманов. Суть підходу заключалась в тому, що із вирішення пружно-пластичної задачі визначаються переміщення на контурі виробки  $U_o$ , величина яких залежить від розміру зони не пружних деформацій  $R_L$ . Кріплення повинне мати конструктивну піддатливість не меншу  $U_o$ . Після утворення зони не пружних деформацій напівзруйновані породи над виробкою обвалюються і створюють навантаження  $p_0$  на

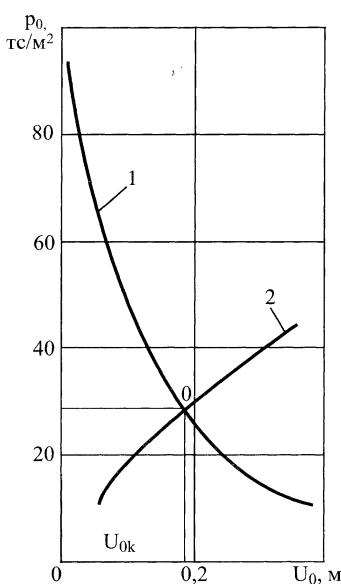
кріплення. Обвалювання порід за Ю.М. Ліберманом відбувається по вертикальним поверхням і обмежується контуром, який розділяє пружну і не пружну області (рис. 4).

Це дуже схоже на утворення зводу природного утворення. У зв'язку з цим викладений підхід і отримав назву по заданими деформаціям і навантаженням.

Залежність  $U_0 = f(p_0)$  має наступний вигляд

$$U_0 = \alpha \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{\beta_1 \gamma H + R_c}{\beta_2 + 2} \cdot \left[ \frac{2\gamma H - R_c}{(\beta_1 + 2)p_0} \right]^{\frac{2}{\beta_2}} \cdot R_0, \quad (18)$$

де  $U_0$  – радіальне зміщення контура виробки,  $\alpha$  – релогічний параметр,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $E$  – модуль Юнга.



$$\beta_1 = \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho_1}; \quad \beta_2 = \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho_2}, \quad (19)$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – кут внутрішнього тертя відповідно пружної та не пружної областей породного масиву,  $p_0$  – реакція кріплення,  $R_0$  – радіус виробки. Графічно залежність (18) представлена кривою 1 на рис. 5.

Аналіз графічної залежності показує, що зростання зміщень при зменшенні опору кріплення необмежено зростає. Однак, при значній піддатливості кріплення зміщення порід може закінчитись відривом деякої частини порід кривлі, тобто утворенням зводу руйнування.

Вага порід у зводі руйнування пропорційна величині зміщення порід на контурі виробки і виражається кривою 2 рис.5. Точка 0 перетину кривих

1 і 2 за Доберманом забезпечує оптимальні параметри кріплення: його грузонесучу здатність  $p_0$  і піддатливість  $U_{0к}$ . Розрахунки, виконані за даною методикою, дають результати, які достатньо

близькі до вимірюваних в натурних умовах, хоча вихідні посилання, такі як, представлення руйнування порід у області виробки у вигляді сипкого середовища без зчеплення середовища, умова її нестискання в процесі деформування явно не відповідають дійсності.

### **Тема 8. Лекція 11. ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КРІПЛЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТВОЛІВ**

Вертикальні стволи шахт є головними в комплексі виробок, забезпечуючи зв'язок підземної частини підприємства з поверхнею.

Це виробки довгострокового призначення і у зв'язку з цим, до них висувають підвищені вимоги: кріплення стволів не повинне мати ушкоджень, що досягається вибором відповідного матеріалу і належним запасом міцності, який визначається розрахунком.

Теорії гірського тиску, що дозволяють визначити навантаження на кріплення вертикальних виробок характеризуються трьома напрямками.

Перший напрямок заснований на застосуванні простих фізичних моделей, відповідно до яких навантаження на кріплення створюється бічними породами, що мають той чи інший ступінь руйнування. При цьому величина навантаження не залежить від часу, технології і характеристик самого кріплення. В основу розрахункових методів цього напрямку покладена теорія розрахунку підпірних стін.

Другий напрямок заснований на гіпотезах взаємодії кріплення, що спільно деформується з навколишнім породним масивом. У цьому випадку навантаження на кріплення залежить і від жорсткості кріплення, і від параметрів технології його зведення.

Третій напрямок утворюють емпіричні методи, що ґрунтуються на результатах відповідним чином оброблених і представлених шахтних і лабораторних експериментів.

#### **Методи розрахунку навантаження на кріплення ствола, оснований на теорії розрахунку породних стін**

Перше теоретичне рішення задачі про тиск гірських порід на кріплення шахтного стовбура було запропоновано М.М. Протодьяконовим понад 80 років тому. Воно ґрунтувалося на уявленні про породи як незв'язаного (сипучого) середовища. Відомо, що відповідно до теорії розрахунку підпірних стін, горизонтальний

тиск у такому середовищі дорівнює:

$$P_{\bar{a}} = \gamma H t g^2 \frac{90^\circ - \rho}{2}, \quad (1)$$

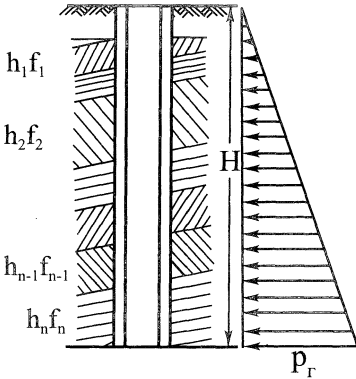


Рис. 1. Розрахункова схема визначення навантаження на кріплення ствола за М.М. Протодьяконовим

де величина  $t g^2 \frac{90^\circ - \rho}{2}$  –

коефіцієнт бічного розпирання для сипучого середовища,  $\gamma$  – густина породного масиву.

Розрахункова схема для вирішення задачі приведена на рис. 1.

При перетині  $n$  пластів, які володіють різними фізико-механічними властивостями, М.М. Протодьяконов рекомендував розраховувати середньозважене значення кута внутрішнього тертя за формулою:

$$\rho_{\bar{n}\delta} = \text{arctg} \frac{f_1 h_1 + f_2 h_2 + \dots + f_n h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n}, \quad (2)$$

де  $f_n$  – коефіцієнт міцності  $n$ -го пласта,  $h_n$  – потужність  $n$ -го пласта.

Як впливає з формули (1), тиск на кріплення ствола має місце в породах будь-якої міцності, на будь-якій глибині і пропорційний цій глибині.

Практика ж показує, що при перетинанні міцних порід стінки ствола можуть довгі роки зберігати стійкість навіть без кріплення.

Ця невідповідність теоретичних висновків результатам натурних спостережень спонукала П.М. Цимбаревича внести зміни в розрахункову схему, представлену вище.

Перша зміна (1933 р.) полягала в тому, що горизонтальне навантаження на кріплення визначалось для кожного шару, який пересікав ствол, відповідно до його фізико-механічних характеристик

(рис. 2).

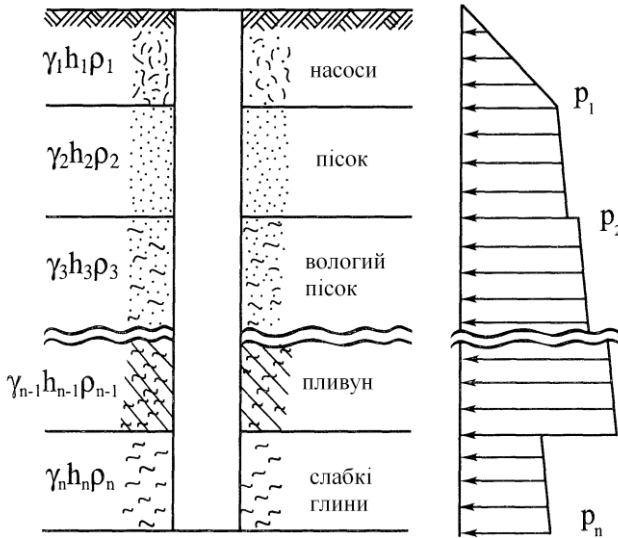


Рис. 2. Розподілення навантаження на кріплення ствола за П.М. Цимбаревичем

Величина навантаження визначалася на контактах у вище лежачому  $p'_{n-1}$  і нижчележачому  $p''_{n-1}$  шарах:

$$p'_{n-1} = tg^2 \frac{90^\circ - \rho_{n-1}}{2} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_i \gamma_i \right); \quad (3)$$

$$p''_{n-1} = tg^2 \frac{90^\circ - \rho_n}{2} \left( \sum_{i=1}^{n-1} h_i \gamma_i \right), \quad (4)$$

де  $\gamma_i$  – об'ємна вага порід  $i$ -го пласта;  $h_i$  – потужність  $i$ -го пласта;  $\rho_n$  і  $\rho_{n-1}$  – величина кута внутрішнього тертя в суміжних пластах. При таких розрахунках еюра навантажень на кріплення має вигляд, зображений на рис. 2.

У 1953 р. П.М. Цимбаревич вніс друге уточнення у свій метод, врахувавши можливість відсутності тиску в міцних шарах породи.

Умови відсутності тиску в шарі забезпечується умовою

$$R_c \geq \frac{2\mu}{1-\mu} \gamma H, \quad (5)$$

де  $R_c$  – межа міцності порід шару на одноосне стиснення,  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона порід шару.

У загальному вигляді, з урахуванням величини зчеплення порід, викладена вище задача була вирішена А.П. Максимовим. Тиск на кріплення ствола в цьому випадку визначається за формулою:

$$P_{\bar{a}} = \frac{\gamma H(1 - \sin \rho) - 2C \cos \rho}{1 + \sin \rho}, \quad (6)$$

де  $C$  – зчеплення порід.

З формули (6) можна визначити граничну глибину, починаючи з якої породи переходять у нестійкий (сипучий) стан:

$$H_{np} = \frac{2C}{\gamma(1 - \sin \rho)}. \quad (7)$$

### **Методи, основані на гіпотезі спільного деформування системи «кріплення ствол–порода»**

У 1925 р. А.Н. Динник запропонував використовувати для рішення задач гірського тиску методи теорії пружності. Пізніше М.М. Протодьяконов довів неспроможність цих пропозицій, ґрунтуючись на тому, що пружні деформації реалізуються в твердих тілах (породах) набагато швидше, ніж може бути зведене кріплення у виробці. Крім того, наявність порід у пружному стані саме по собі є гарантією стійкого стану породного масиву.

Першою роботою, в якій були враховані пластичні деформації, що виникають у процесі руйнування приконтурного породного масиву, була робота Ф.А. Белаєнко. В основу рішення покладена передумова про те, що тиск на кріплення виникає лише на глибині, де породи під впливом діючих напружень переходять у пластичний стан. Величина навантаження – це результат спільного деформування системи «кріплення-порода».

Напруги, що діють у нетронутому породному масиві, прийняті наступними:

$$\sigma_z = \gamma H, \quad \sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H. \quad (8)$$

Умова переходу порід у пластичний стан має вигляд:

$$S = \frac{R}{\sqrt{3}} m \varepsilon \lambda, \quad (9)$$

де  $S$  – інтенсивність напруження здвигу,  $\varepsilon$  – інтенсивність деформацій здвигу,  $R$  – межа пружності;  $m$  і  $\lambda$  – параметри кривої пластичного деформування, визначені дослідним шляхом.

Основна умова спільної роботи кріплення і бічних порід визначається рівнянням:

$$U_a = U_a = U_k, \quad (10)$$

$$t \rightarrow \infty \quad t \rightarrow 0$$

де  $U_a$  – кінцеві зсуви контуру виробки;  $U_a$  – початкові зсуви контуру виробки;  $U_k$  – пружні зсуви зовнішніх точок циліндра кріплення.

Розрахунки, виконані Ф.А. Белаенко, досить складні і громіздкі, дали результати, які добре узгоджуються з натурними вимірюваннями.

В аналогічній постановці, але з врахуванням реологічних властивостей порід і матеріалу кріплення, була розроблена методика розрахунку кріплення вертикальних стволів групою авторів на чолі з К.В. Руппенейтом. У задачі породний масив розглядався як пружне середовище, в якому виконана виробка з кріпленням. У цьому середовищі під впливом навантажень виникає повзучість деформацій і релаксація напружень. Зведення кріплення відбувається з деяким відставанням від вибою, за цей час контур виробки деформується всередину на деяку величину  $U_0$ . Після зведення кріплення процес переміщення контуру продовжується за рахунок повзучості деформацій, однак йому протистоїть опір кріплення. Спільне деформування породного масиву і кріплення продовжується доти, поки в системі «кріплення-порода» не реалізується стан рівноваги. Ця частина зсувів позначається  $U_q$ . Кінцева величина зсувів дорівнює:

$$U_{q(\infty)} = U_0 + U_q. \quad (11)$$

Характер взаємодії кріплення і бічних порід показаний на рис. 3. При зсуві кріплення, рівному нулю, тиск на нього буде дорівнювати



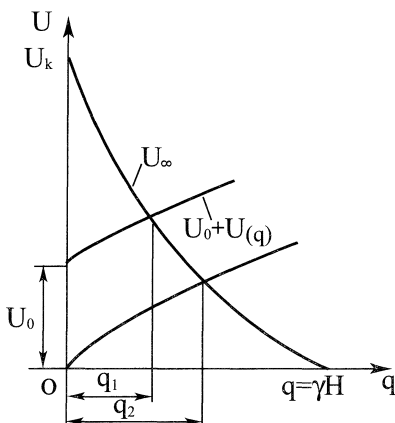


Рис. 3. Графік залежності тиску на кріплення  $q$  від величини зміщення порід  $U$

$\gamma H$ , а при деякій величині зсуву кріплення рівному  $U_k$ , тиск на кріплення може бути рівним нулю. При зведенні кріплення слідом за вибоєм ( $U_o=0$ ) тиск на кріплення більший, ніж при зведенні кріплення з відставанням від вибою ( $U_o=0$ ). Виходячи з цього, для різних порід були прийняті відповідні реологічні моделі. Зокрема, для скельних порід прийнята модель Пойтінга-Томпсона.

### Емпіричні методи визначення навантаження на кріплення стволів

Відсутність достатньо надійних методів визначення навантаження на кріплення вертикальних стволів викликало необхідність у постановці натурних експериментів у діючих стволах. Найбільш широко ці експерименти були виконані в ВНИМИ. На основі обробки отриманих результатів був запропонований емпіричний метод розрахунку, закладений у СНиП-П-94-80. Цей метод поширюється на гірничо-геологічні умови основних вугільних басейнів (Донбас, Кузбас, Караганда) при циліндричній формі кріплення з монолітного і збірного бетону, залізобетону й інших матеріалів при діаметрі ствола до 8 м і подачі води до 8 м<sup>3</sup>/год.

Порядок розрахунку у відповідності зі СНиП-П-94-80 наступний.

Розрахунок кріплення протяжної частини ствола виробляється на сумарну дію горизонтального (радіального) тиску порід  $P_n$  і тиску залишкового напору підземних вод  $P_z$  з врахуванням технологічного і монтажного навантажень.

Розрахунковий горизонтальний (радіальний) тиск порід  $P_n$  на кріплення протяжної частини вертикальної виробки без врахування впливу очисних робіт визначають за формулою:

$$P_n = nm_y n_H P^H (1 + 0,1(R_0 - 3)), \quad (12)$$

де  $R_0$  – радіус виробки, м;  $n$  – коефіцієнт перевантаження, рівний 1,3;  $m_y$  – коефіцієнт умов роботи, що залежить від виду кріплення (збірне – 0,75; монолітне – 0,80);  $n_H$  – коефіцієнт приведення до розрахункового (максимального) тиску, при нерівномірній епюрі навантажень, табл. 1,  $P^H$  – нормативний тиск на кріплення, КПа, який визначається для порід I, II, III категорії відповідно до критерію стійкості порід за формулами:

$$\text{при } c \leq 6, \quad P^H = 10((2c - 1) + \Delta); \quad (13)$$

$$\text{при } 10 \geq c \geq 6, \quad P^H = 10((3c - 7) + \Delta), \quad (14)$$

де  $c$  – критерій стійкості;  $\Delta$  – параметр, що враховує технологію прохідницьких робіт, приймається рівним нулю при послідовній і паралельній схемах.

Таблиця 1

Коефіцієнт приведення

Кут залягання порід, $\alpha$ , град	Коефіцієнт $n_H$	
	при послідовній і паралельній схемах проходки	при сумісній схемі проходки
до 10	2,00	1,75
від 10 до 35	2,50	2,00
більше 35	2,75	2,25

СНиП-П-94-80 передбачає можливість визначення навантаження на кріплення ствола в районі спряження, а також на устя ствола.

Загальним недоліком всіх емпіричних методів є величезна кількість коефіцієнтів, за допомогою яких формули приводяться до конкретних гірничо-геологічних умов. Це знижує точність і надійність розрахунків.

## Тема 9. Лекція 12. ВЗДУТТЯ ПОРІД ГРУНТУ ПІДЗЕМНИХ ВИРОБОК

*Вздуттям* називають значні деформації, які проявляються у вигляді видавлювання породної маси з боку ґрунту всередину виробок.

Підняття порід ґрунту може досягати великих розмірів (більше 1 м) і навіть призвести до практично повної ліквідації виробки. У залежності від гірничо-геологічних умов цей процес є затухаючим, або незатухаючим у часі.

Існує кілька гіпотез, що пояснюють причину видавлювання порід у гірських виробках:

- набрякання порід під дією вологи;
- збільшення об'єму порід у зоні непружних деформацій у наслідок їхнього пластичного розпушення;
- випирання порід під впливом опорного тиску в боках виробки;
- сорбційне набрякання газонасичених пористих середовищ;
- втрата пружнопластичної стійкості порід в області непружних деформацій.

У залежності від використовуваних фізичних моделей усі методи оцінки явища видавлювання порід у гірські виробки можна розділити на чотири групи:

- засновані на застосуванні рівнянь статички сипучих середовищ;
- засновані на використанні реологічних рівнянь;
- засновані на рівняннях теорії пружнопластичної стійкості;
- засновані на емпіричних залежностях.

### **Тиск на кріплення зі сторони ґрунту виробки**

Досить детально задача визначення тиску на кріплення з боку ґрунту виробки була вперше вирішена П.М. Цимбаревичем на основі підходу, запропонованого К.Терцагі. Задача розглядалася стосовно породного середовища, яке має внутрішнє тертя і позбавлене зчеплення.

Породи ґрунту у виробці навантажені зверху по лінії 1-1 (рис. 1, а) деяким вертикальним навантаженням, під впливом якого відбувається видавлювання порід всередину виробки. Розглядається умова взаємодії призми сповзання ABC (активний тиск) і призми випирання ACE (пасивний тиск). При цьому допускається, що породи розпушені і не мають зчеплення, а висота стовпа порід, що формує зусилля випирання в ґрунті, дорівнює  $h_1 = h + b$ , де  $h$  – висота виробки,  $b$  – висота зводу природної рівноваги.

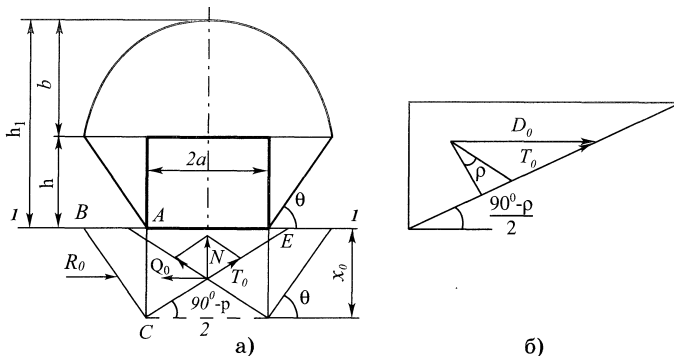


Рис. 1. Схема взаємодії призм сквоання і випирання за П.М. Цимбаревичем

Задача вирішується у наступній послідовності. Спочатку визначають глибину зони порід, що зрушуються:

$$x_0 = h_1 \frac{\operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right)}{1 - \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right)}, \quad (1)$$

де  $h_1$  – висота стовпа порід, що формує зусилля випирання в ґрунті; величина  $\operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right)$  коефіцієнт бічного розпирання для сипучого середовища.

Порода на глибині, яка перевищує  $x_0$ , знаходиться в стані рівноваги, а на глибині меншій за  $x_0$  – у стані руху в сторону виробки.

Горизонтальний тиск зі сторони виробки ґрунту рівний:

$$D_0 = R_0 - Q_0 = \frac{\gamma}{2} (X_0^2 - 2X_0 h_1) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \rho}{2} - \frac{1}{2} \gamma X_0^2 \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ + \rho}{2}, \quad (2)$$

де  $R_0$  – активний тиск;  $Q_0$  – пасивний тиск;  $\gamma$  – об’ємна вага гірських порід.

Горизонтальні сили  $D_0$  приводять до виникнення сил на похилих площадках, що в свою чергу, утворюють нормальну рівнодійну  $N$ , спрямовану вверх (рис. 1).

Величину сили  $T_0$  визначають зі схеми (рис. 1, б), за теоремою

синусів:

$$T_0 = \frac{D_0}{2 \sin \frac{90^\circ + \rho}{2}}, \quad (3)$$

де  $D_0$  – горизонтальний тиск.

Силу  $N$ , яка характеризує сумарний тиск порід зі сторони ґрунту, отримують (рис. 1, а) за формулою:

$$N = 2T_0 \sin \frac{90^\circ - \rho}{2} = D_0 \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}. \quad (4)$$

### **Реологічні методи оцінки видавлювання порід ґрунту у виробках**

Практика показує, що видавлювання порід ґрунту в гірських виробках є типовим тимчасовим процесом. Зовнішні прояви процесу видавлювання виявляються не миттєво слідом за підсуванням вибою, а виявляються з часом і тривають тижнями, місяцями і навіть роками. Таким чином, вивчення вздування порід ґрунту в реологічній постановці у великій мірі відображають його фізичну суть і становлять значний інтерес з погляду математичного моделювання явища.

Одна з таких задач була вирішена А.П. Максимовим. Фізична модель являє собою дифузор, що має вигляд двох плоских стінок, що сходяться під кутом  $\alpha$  одна до одної, через який відбувається витікання деякого дуже в'язкого середовища. Якщо покласти кут  $\alpha=180^\circ$ , то одержимо схему, зображену на рис. 2. Необхідною умовою виникнення в'язкої течії є наявність у ґрунті виробки напружень, які перевищують граничний опір порід здвигу. Вихідними є рівняння Нав'є-Стокса і рівняння середовища Бінгама-Шведова. У результаті рішення отримані залежності для визначення зсувів у ґрунті виробки і величини навантаження на кріплення. Аналітичні результати добре підтверджують результати натурних вимірювань і фізичного моделювання.

Як видно з рис.2, зсуви захоплюють значну область у ґрунті виробки, зменшуючись у міру віддалення у глибину масиву, і практично затухають на відстані, рівній, приблизно,  $7 \dots 8^\circ$  виробки.

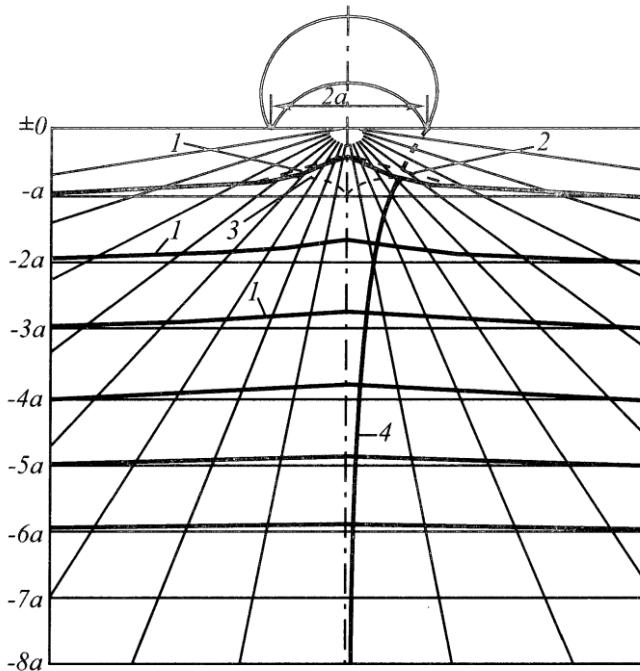


Рис. 2. Область деформування порід у ґрунті виробки: 1 – радіальні зміщення; 2 – вертикальні зміщення; 3 – горизонтальні зміщення; 4 – вертикальні зміщення точок, розміщених на осі виробки.

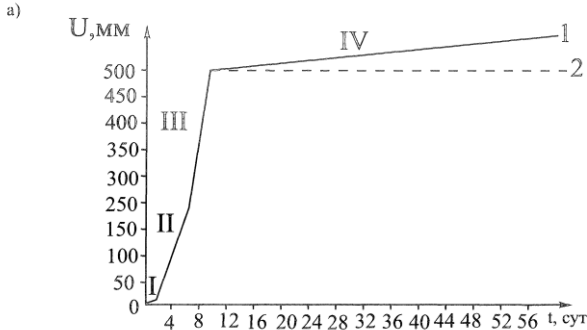
Недоліком гідродинамічного підходу до рішення задач геомеханіки є обов'язкове використання констант, визначення яких для гірських порід є досить складним, наприклад числа Рейнольдса.

### **Пружно-пластична стійкість породного масиву в межах одиначної виробки**

На основі лабораторних, натурних і аналітичних досліджень запропонований підхід до вивчення проблеми вздуття порід ґрунту підземних виробок. В його основі лежить гіпотеза про втрату пружно-пластичної стійкості породного масиву в місці одиначного вироблення. Дослідження дозволили виділити в місці виробки, у міру віддалення від вибою, чотири області, що характеризуються різною інтенсивністю протікання механічних процесів: I - область пружного деформування; II – область пластичних деформацій; III – область вздуття порід ґрунту; IV - область стабілізації (2) чи неста-

білізації (1) процесу вздуття порід ґрунту.

На рис. 3. приведені типові графіки зсувів і швидкостей зсувів контуру виробки для шахти «Білозерська» ГК «Добропольвугілля», де вздуття порід ґрунту є найбільш характерним проявом гірського тиску.



Удаление реперной станции  
от забоя выработки

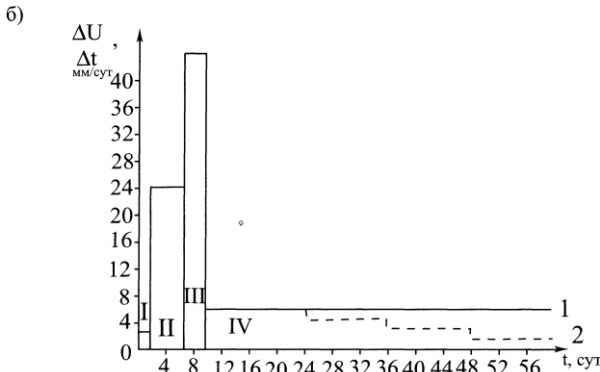


Рис. 3. Зміщення (а) і швидкості зміщення (б) контуру корінного штрека ш. «Білозерська» ГК «Добропольвугілля» (1 – незатухаючий процес, 2 – затухаючий процес)

Область вздуття порід ґрунту (III) слабо просліджується на графіку зсувів, але чітко видна на графіку інтенсивності зсувів (рис. 3, б). Вона характеризується досить швидким протіканням процесу і

різким збільшенням зсувів після досягнення ними деякої критичної межі в попередній області.

Четверта область завершує процес активного деформування приконтурного породного масиву. Інтенсивність деформацій різко падає, вони або стабілізуються (графік 2), або не стабілізуються у часі (графік 1).

Аналіз натурних і лабораторних досліджень показує, що всі вони з поправкою на конкретну гірничо-геологічну ситуацію, досить близько відображають картину розвитку вздуття порід ґрунту. Ця обставина вже сама по собі говорить про те, що в основі явища лежить деяка загальна фізична закономірність.

Початок вздуття порід ґрунту виробок завжди зв'язаний з утворенням третьої області. Характерною її особливістю є дуже швидкий ріст деформацій протягом досить короткого проміжку часу, що відбувається після того, як пластичні деформації досягають деяких граничних (критичних) значень. З енергетичної точки зору відбувається наступне: при незначній зміні напруженого стану відбувається відносно швидко виділення потенційної енергії, яка витрачається на додаткове руйнування структурних зв'язків у породному масиві і його розпушення, що супроводжується істотним збільшенням об'єму. Після цього механічна система знову приймає стан рівноваги.

Швидкість переходу з одного енергетичного стану в інший визначається структурними особливостями порід у масиві. Для крихких порід вона може бути дуже високою, для порід, що містять велику кількість глинистих часток, швидкість переходу буде порівняно невеликою, а подальший процес – тривалим, і в залежності від умов, затухаючим чи незатухаючим.

У фізиці перехідні процеси, що характеризуються різкою зміною одного параметра (переміщення на контурі виробки) при незначному збільшенні іншого (компоненти напружень на зовнішньому контурі), називають *втратою стійкості рівноваги*. У розглянутому явищі – це пружно-пластична втрата стійкості рівноваги породного масиву

### **Емпіричні методи прогнозу вздуття порід ґрунту**

Методи визначення параметрів процесу вздуття порід ґрунту в гірських виробках, основані на узагальненні досить великої кільк-



кості натурних вимірювань, називаються емпіричними. Найбільш відомими з них є метод Ю.З. Заславського і І.Л. Черняка.

Ю.З. Заславський вважає, що основними факторами, що визначають наявність і параметри процесу вздуття порід ґрунту, є наступні: рівень напружень у місці виробки, який визначається вагою вище лежачої товщі порід, міцністю порід, кутом їхнього залягання, шаруватістю масиву, орієнтуванням виробок стосовно нашарування (паралельно чи перпендикулярно), їхніми геометричними розмірами і термінами служби.

Основним критерієм, за яким відбувається прогноз вздуття порід ґрунту є безрозмірний параметр  $\frac{\gamma H}{R_c}$ .

Прийнявши в якості «межі вздуття» величину підняття ґрунту  $l_0=0,20$  м, тобто таку величину, при якій процес вздуття починає впливати на стан виробки, Ю.З. Заславський запропонував номограму, яка дозволяє визначати параметри процесу вздуття. Емпіричний критерій для умов Донбасу, за яким оцінюється схильність порід ґрунту до вздуття для виробки шириною  $a$ , має вигляд:

$$a > \frac{1,22R_c}{\gamma H}, \quad (5)$$

де  $\gamma$  – об'ємна вага вище лежачих порід;  $H$  – глибина розміщення виробки;  $R_c$  – міцність порід на одновісне стиснення.

За даними автора у виробках шириною 3...5 м вздуття починає проявлятися при значеннях безрозмірного параметра:

$$\frac{\gamma H}{R_c} = 0,25 \dots 0,4$$

Ці результати співпадають з результатами вимірювань інших дослідників.

Для розрахунку величини підняття порід ґрунту Ю.З. Заславским запропонована схема, приведена на рис. 4.

Породні шари в ґрунті виробки розглядаються як затиснені балки, що знаходяться під дією поздовжньо-поперечного навантаження. У процесі формування сила  $P$  перевершує деяке критичне значення  $P_{кр}$  після чого шар втрачає стійкість, видувається і лама-

ється в центрі, що призводить до втрати його несучої здатності.

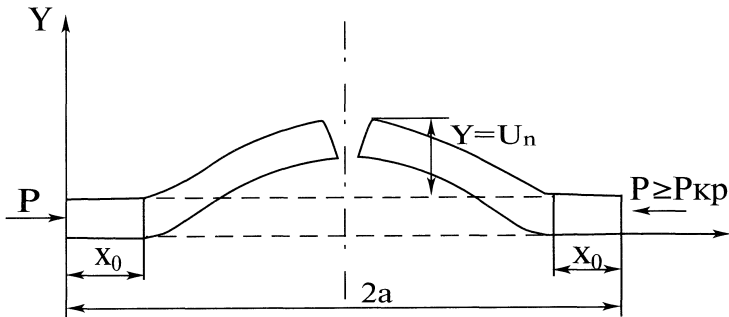


Рис. 4. Схема для визначення величини підняття порід ґрунту за Ю.З. Заславським

Величина підняття порід ґрунту  $U_n$  визначається за формулою:

$$U_i = 0,11 ah \sqrt{\left( \frac{0,85 \gamma H - 0,15 \left( \frac{R_c}{R_0} \right)^2 \cdot p}{R_c} - 1 \right)}, \quad (6)$$

де  $h$  – висота виробки;  $H$  – глибина розміщення виробки;  $\gamma$  – об’ємна вага вище лежачих порід;  $R_c$  – міцність порід на одновісне стиснення;  $R_0=300$  кг/см<sup>2</sup> – умовна міцність гірських порід;  $p$  – відсіч кріплення з боків.

І.Л. Черняк на підставі узагальнення великої кількості натурних спостережень і результатів лабораторного моделювання на моделях з еквівалентних матеріалів розробив ймовірно-статистичний метод прогнозу вздуття. Основними факторами, що визначають параметри процесу, є: глибина розробки, міцність порід, їхня потужність і петрографічний склад, а також площа поперечного перерізу виробки.

Метод дає можливість не тільки констатувати наявність вздуття, але і визначити його інтенсивність.

Загальним недоліком будь-яких емпіричних підходів є те, що застосування встановлених закономірностей обмежене тими регіонами, у межах яких відбувається відбір статистичної інформації.

## **Тема 10. Лекція 13. ДИНАМІЧНИЙ ПРОЯВ ГІРСЬКОГО ТИСКУ**

Динамічними проявами гірського тиску називають швидкоплинні катастрофічні явища, що виникають у підземних виробках. До них відносять гірські удари, викиди породи вугілля і газу, стріляння гірських порід. У вугільних шахтах газодинамічні явища найчастіше реалізуються у формі раптових викидів вугілля, породи і газу.

### **Раптові викиди вугілля, породи і газу в підземних виробках**

Перше згадування про раптові викиди вугілля і газу відносять до 1834 року, коли на шахті «Ісаак» вугільного басейну Луари у Франції вперше було зареєстроване це явище. У міру переходу шахт Бельгії і Франції на більш глибокі горизонти частота і сила раптових викидів зростали. У Донбасі перший викид вугілля і газу відбувся в 1906 році при розкритті шару шахти «Нова Смолянка» на горизонті 728 м.

До кінця 19 століття число викидів в одному тільки басейні Гір (Південна Франція) перевищило 2000. Ці явища стали відомі в Німеччині (Рур, Нижня Сілезія), Англії (Південний Уельс), Угорщині і Канаді.

У гірничотехнічній літературі спеціальні статті, присвячені раптовим викидам, з'явилися у 80-х роках 19-го століття після сильного раптового викиду в 1879 р у шахті «Агріпп» №2 (Бельгія). Під час цієї аварії було викинуто 420 т вугілля, близько 2000 м<sup>3</sup> метану і загинула 121 людина. Ще більша аварія відбулася на початку 20 століття на копальні «Моржен» (Британська Колумбія), коли було раптово викинуто 3500 т вугілля і 700000 м<sup>3</sup> метану.

«Раптовим викидом вугілля і газу вважається явище лавинонаростаючого зсуву вугілля під дією гірського тиску» яке супроводжується динамічним ефектом з відкиданням вугілля і тонким його подрібненням», значним виділенням газу в короткий час і утворенням характерної порожнини в пласті».

Необхідність точного визначення раптового викиду вугілля і газу була викликана тим, що динамічні явища, що виникають в різних гірничотехнічних і гірничо-геологічних умовах, розрізняються як за фізичною сутністю процесів їх утворення і розвитку, так і за ступенем наслідків. Тому напрямки досліджень у цій області, в

тому числі гіпотези, теорії, методи прогнозування і боротьби з такими явищами, також виявляються різними. Для узагальнення світового досвіду і систематизації проведених досліджень робоча група Європейської економічної комісії (ЄЕК) у жовтні 1994 р прийняла «Класифікацію динамічних явищ у шахтах» і рекомендувала використовувати її в гірничо видобувній промисловості.

Єдина класифікація динамічних явищ створена на основі енергетичної теорії гірських ударів, енергетичної силової теорії викидів вугілля, породи і газу, узагальнення світового досвіду в рішенні проблем динамічних явищ на вугільних шахтах. У класифікації (табл. 1) виділяються чотири класи явищ: гірські удари, викиди газу, викиди вугілля, породи і газу, гірничотехнічні явища.

Таблиця 1

Єдина класифікація динамічних явищ робочої групи по вугіллю ЄЕК ООН

Класи динамічних явищ	Гірські удари	Викиди газу	Викиди вугілля (породи) і газу	Гірничотектонічні явища
Види енергії, які приймають участь у формуванні динамічних явищ	Енергія напружених порід і вугілля	Енергія газу	Енергія напружених вугілля та порід, газу	Енергія напружених вугілля та порід, газу і сейсмічних хвиль

Оскільки в умовах будівництва і експлуатації вугільних шахт України класом динамічних явищ, що частіше зустрічається є раптові викиди вугілля (породи) і газу, то далі будемо розглядати тільки дану проблему.

Визначення раптового викиду, дане акад. А.А. Скочинським, дозволяє класифікувати явище, що відбулося у виробці, відповідно до інших видів динамічних явищ, представлених у табл. 1.

Однак для експертної оцінки явища необхідно знати характерні ознаки раптового викиду. Такими ознаками є:

- відкидання вугілля від вибою;
- утворення порожнини у вугільному пласті;
- зміщення вугілля у виробку;

- пошкодження і відкидання обладнання;
- підвищене, у порівнянні зі звичайним, виділення газу в гірську виробку;
- наявність тонкого вугільного пилу («скаженого борошна») на відкосі викинутого вугілля та на кріпленні.

Ознаки, приведені в перших чотирьох пунктах, є наслідком появи ударної хвилі, яка поширюється в повітряному середовищі виробки з надзвуковою швидкістю. Це свідчить, з однієї сторони, про швидкоплинність розвитку процесу, з іншої сторони – про значну енергію, яка при цьому виділяється.

### **Фізичні і структурні особливості системи «вугілля-метан»**

Вугілля є високомолекулярною сполукою, яка утворилася шляхом реакцій конденсації і різних хімічних з'єднань, які входять до складу відмерлих рослин. Фізичні властивості вугілля змінюються в залежності від складу рослинності, умов її нагромадження і поховання і яка впливає на утворення вугілля того чи іншого типу.

З точки зору фізичної структури вугілля являє собою пористе тіло, розмір пор якого змінюється в межах від  $10^{-10}$  до  $10^{-4}$ . Наявність пор такого малого розміру зумовлює, по-перше, появу такої властивості вугілля як сорбція, тобто явища поглинання газу поверхнею чи об'ємом твердого тіла, і, по-друге, здатність утримувати поглинений газ (метан) у порах силами молекулярних зв'язків. Кількість утримуваного в такий спосіб газу залежить від сорбційної ємності вугілля і визначається питомою поверхнею пор (у кв. метрах на 1 грам вугілля). Питома поверхня видобувного вугілля складає в середньому  $200 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Кількість кубометрів газу, що приходить на одиницю об'єму вугілля, доходить до  $54 \text{ (м}^3 \text{ метану/м}^3 \text{ вугілля)}$ . Цей газ знаходиться у зв'язаному стані й утримується силами молекулярних зв'язків. Із загального вмісту газу у вугільному пласті його частка складає від 90 до 98 % і тільки від 2 до 10% припадає на вільний газ, здатний мігрувати в системі макропор і тріщин.

Таким чином, вугілля є могутнім сорбентом, а його метаноємність визначається структурою і безпосередньо не залежить від величини гірського тиску. Зв'язаний на молекулярному рівні газ має великий запас внутрішньої енергії, яка при переході його зі зв'язаного стану у вільний реалізується у виді раптового викиду тонко-

подрібненого вугілля і газу. Розмір частинок викинутого вугілля, так званого «скаженого борошна», складає близько  $10^{-10}$  м і свідчить про те, що вони утворилися в результаті розриву пор внутрішнім тиском.

Причиною, що зумовлює раптовий викид, є критична сукупність факторів (напружений стан вугілля і порід, неотектоніка, структура масиву, його газонасиченість і міцність, геометричні розміри штучно створеної порожнини, темпи її спорудження, зусилля працюючих механізмів), яка приводить до того, що після чергового, досить малого, впливу в процесі видобутку вугілля вона катастрофічно швидко втрачає стійкість і переходить з одного рівноважного енергетичного стану в інший, який володіє більш низьким рівнем енергії.

### Теорії газодинамічних явищ

У 1961 р. В.В. Ходотом на основі обробки і узагальнення великої кількості лабораторних і натурних досліджень була сформульована енергетична теорія викидів. Відповідно з цією теорією для збудження і розвитку раптового викиду вугілля і газу необхідне одночасне порушення трьох рівноважних станів: енергетичного, кінетичного і силового.

Умова порушення енергетичного балансу має наступний вигляд:

$$W + K + Q > F + V, \quad (1)$$

де  $W$  – потенційна енергія вугілля;  $K$  – кінетична енергія порід;  $Q$  – внутрішня енергія вільного газу;  $F$  – витрати енергії у вугіллі, які пов'язані з його переміщенням у виробку;  $V$  – витрати енергії, які пов'язані з руйнуванням вугілля.

Порушення кінетичного балансу між швидкістю руйнування вугілля ( $V_p$ ) і швидкістю падіння тиску газу ( $V_a$ ) у тріщинах вугілля має вигляд:

$$V_p > V_a. \quad (2)$$

До моменту закінчення руйнування вугілля тиск газу повинен перевищувати опір маси її відкидання у сторону виробки:

$$p \cdot S > m[g(\cos \alpha \pm \sin \alpha) + a], \quad (3)$$

де  $p$  – тиск газу,  $S$  – площа поперечного перерізу зруйнованого блоку вугілля,  $m$  – маса вугілля,  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\alpha$  – кут нахилу пласта,  $f$  – коефіцієнт тертя вугілля по породі,  $a$  – прискорення, яке треба надати вугіллю для його відкидання.

Енергетична теорія В.В. Ходота систематизувала різні уявлення вчених про природу раптових викидів і стала основою для розробки різних методів прогнозу викидонебезпечних ситуацій.

У наступні роки з'явилися нові гіпотези газодинамічних явищ, засновані на більш досконалих фізичних уявленнях і математичних моделях. Академік С.А. Христианович запропонував теорію хвильового дроблення у вугільному шарі, як фактора розв'язання і протікання раптового викиду. У наслідок цього ці уявлення були розвинуті в роботах І.М. Петухова і А.М. Линькова і сформульовані як механізм «пошарового відриву».

Причиною раптового викиду за І.М. Петуховим і А.М. Линьковим є швидке оголення поверхні у викидонебезпечній зоні вугільного шару. Погіршена фільтрація сприяє збереженню небезпечного газового тиску на деякій відстані від забою. Різке оголення поверхні у викидонебезпечній зоні, що відбувається внаслідок спонтанного місцевого руйнування чи дії інструменту, викликає перепад у газовому тиску, який достатній для того, щоб здійснити відділення частинок від поверхні.

Газ, що розширюється, при цьому рухається у область пониженого тиску (у виробку) і захоплює частинки вугілля, що відірвалися. У наслідок цього виникає нова оголена поверхня і процес відділення і віднесення частинок багаторазово повторюється: фронт дроблення поширюється всередину шару, у виробку – потік газу, що розширюється, і частинки, що відірвалися.

Групою українських вчених (Ф.А. Абрамов, А.М. Зорін, В.Е. Забігайло і ін.) ступінь викидонебезпечності оцінюється на основі кількісної (розрахункової) оцінки стійкості, яка визначається як відношення несучої здатності масиву до діючого напруженому стану. Це відношення називається коефіцієнтом стійкості і визначається за формулою:

$$K_y = \frac{\sigma_{\partial\partial\zeta}}{\sigma_{i\partial}}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{раз}$  – приведена несуча здатність масиву,  $\sigma_{пр}$  – приведений несучий стан.

### **Способи запобігання і методи прогнозу газодинамічних явищ**

*Способи запобігання газодинамічних явищ.* Способи запобігання раптових викидів вугілля і газу засновані на зниженні рівня напружень в привибійній області шару вугілля, що відпрацьовується та зміні його структури. Вони поділяються на регіональні і локальні.

*Регіональні* способи запобігання раптових викидів призначені для завчасної обробки вугільного масиву перед очисним і підготовчим вибоєм. Вони включають:

- випередження відпрацювання вугільних пластів;
- зволоження вугільних пластів.

*Локальні* способи призначені для приведення привибійної частини вугільного масиву в безпечний стан. До них відносяться:

- низьконапірне зволоження вугільного шару;
- гідророзпушення;
- гідровимивання випереджаючих порожнин;
- буріння випереджаючих свердловин;
- торпедування;
- утворення розвантажувальних пазів і щілин.

*Методи прогнозу газодинамічних явищ.* Найбільш відомими на даний час є методи прогнозу газодинамічних явищ, які засновані на:

- аналізі якості бурової крошки при бурінні контрольних шпурів;
- аналізі тривалості буріння одного метра контрольного шпура;
- аналізі початкової швидкості газовиділення зі шпурів;
- динаміці початкової швидкості газовиділення з контрольних шпурів;
- безперервної реєстрації акустичної емісії;
- аналізі акустичної емісії апаратурою АК.

Розглянемо їх у викладеному вище порядку. Буріння свердловин в аномально напружених вугільних пластах супроводжується руйнуванням і непружним деформуванням вугілля навколо свердловини. При цьому має місце підвищений вихід бурових відходів. При діаметрі коронки 43 мм нормальний вихід штибу (керну) звичайно складає близько 2,5 л/м (об'єму) чи 2,0 кг (ваги). У небез-



печних для викидів зонах обсяг штибу досягає 100 і більше літрів з одного метра шпуру.

У процесі буріння вугільних шпурів на викидонебезпечних пластах час буріння одного метра шпуру залежить не стільки від міцності вугілля, скільки від його напруженого стану, тому, що у випадку коли напруги перевершують міцність вугілля, шпур зменшується в об'ємі за рахунок руйнування його стінок. Починається затиснення бурового інструменту і час буріння істотно збільшується.

Цей показник суб'єктивний, але його визначення зв'язане з мінімальними втратами і найменш трудоемне.

Вимірювання початкової швидкості газовиділення проводять у контрольному шпурі діаметром 43 мм на інтервалах 1,5; 2,0; 3,5 м при вимірювальній камері 0,5 м. Шпури необхідно бурити через кожні 2 м у підготовчих виробках, у комбайнових нішах при роботі за схемою «лава-штрек» і в нижніх просіках крутих пластів при польовій підготовці; через 2,5 м – в очисних вибоях.

Зона відноситься до небезпечної, якщо хоча б в одному з інтервалів контрольного шпуру виміряна початкова швидкість газ овиділення зі шпуру дорівнює  $g_H^k$  і більше.

Критичні значення початкової швидкості газовиділення залежать від марки вугілля і коливаються від 4,5 до 5 л/хв.

Ідея наступного способу основана на факті зниження швидкості газовиділення з масиву в шпур при аномально високих напруженнях у вугільному пласті, оскільки в таких зонах знижується газопроникність вугілля. Технічна реалізація методу така ж як за початкової швидкості газовиділення, однак інформативною ознакою є динаміка зміни цієї швидкості.

Сейсмоакустичний прогноз викидонебезпечності оснований на підвищенні інтенсивності мікротріщиноутворення в породному масиві у випадку коли зароджується викидонебезпечна ситуація.

Основною інформативною ознакою при прогнозі викидонебезпечності за акустичною емісією (АЕ) породного масиву є її активність, яка визначається, як відношення загального числа імпульсів АЕ, зареєстрованих звуковловлюючою апаратурою за інтервал спостереження, до тривалості цього інтервалу.

Акустичний метод прогнозу викидонебезпечності вугільних пластів апаратурою АК є принципово новим методом. Він призначений для безперервної оцінки ступеня напруженого стану недотор-

каного гірського масиву в місці вироблення в процесі ведення видобувних робіт і заснований на активному зондуванні досліджуваної області акустичними сигналами, які генеруються у масив працюючими у вибої механізмами. Як зондувальний сигнал використовують шум прохідного чи очисного комбайна, бурового інструмента.

Інформативним параметром, який підлягає обробці спеціальною апаратурою АК, встановленої на поверхні шахти, служить структура акустичних сигналів, які пройшли через досліджувану область і були вловлені датчиком, що розташований поза місцем ведення робіт. Кінцевою інформацією є покази апаратури у вигляді без розмірного показника, який свідчить про рівень потенційної енергії, зосередженої в зоні відпрацювання.

Висновок «небезпечно» видається, якщо значення інформативної ознаки перевищує деякий критичний рівень.

Цей метод не залежить від природної сейсмоактивності масиву і дозволяє контролювати процес утворення в ньому зон аномальної концентрації напружень.

## **Тема 11. Лекція 14. СТІЙКІСТЬ ЦІЛИКІВ ТА ПОТОЛОЧИН КАМЕР**

При підземній розробці родовищ деяких корисних копалин (калійні солі, вугілля, руда) збереження підготовчих очисних виробок, гірського підприємства в цілому і його частин значною мірою забезпечується залишенням у надрах недоторканої частини корисної копалини чи породи, так званих ціликів.

### **Загальні уявлення**

Призначенням ціликів, як конструктивних елементів підземної частини шахти, є запобігання розвитку недопустимих деформацій на поверхні і в утворених у породному масиві штучних порожнинах.

Далі будемо дотримуватись наступних позначень:  $h_{ц}$ ,  $b_{ц}$ ,  $d_{ц}$  – відповідно висота, ширина і довжина цілика,  $h_{к}$  – ширина камери.

За А.А. Борисовим основними класифікаційними ознаками, які дозволяють виділяти ті чи інші групи ціликів є: призначення, геометрична форма в плані, співвідношення висоти до ширини, структура і розташування в межах ділянок виймання.

За призначенням цілики поділяються на:

- а) *охоронні*, які залишаються для охорони різних наземних і підземних об'єктів від впливу гірських робіт;
- б) *бар'єрні*, які залишаються між сусідніми шахтними полями для загородження проти прориву води чи газів;
- в) *міжповерхові*, які залишаються між сусідніми поверхами з метою забезпечення їх експлуатаційних можливостей;
- г) *дільничні*, які залишаються між сусідніми ділянками;
- д) *панельні*, які залишаються між сусідніми панелями;
- е) *міжблокові*, які залишаються між сусідніми блоками;
- є) *нахилені*, які залишаються для забезпечення стійкості похилих виробок протягом всього терміну їх служби;
- ж) *міжкамерні*, які залишаються між камерами при камерних і камерно-стовпових системах розробки;
- з) *спеціального призначення*;
- і) інші.

За формою в плані розрізняють:

- а) цілики у вигляді довгих стін  $\frac{h_{\delta}}{b_{\delta}} > 3$ ;
- б) цілики у вигляді коротких стін  $\frac{h_{\delta}}{b_{\delta}} = 1 \dots 3$ ;

в) цілики у формі квадратних чи круглих стовпів.

За відношенням висоти цілика до його ширини виділяють:

- а) *низькі*  $\left( \frac{h_{\delta}}{b_{\delta}} < 1,5 \right)$ ;
- б) *високі*  $\left( \frac{h_{\delta}}{b_{\delta}} > 1,5 \right)$ .

За структурою розрізняють цілики:

- а) *однорідні*;
- б) *шаруваті*;
- в) *складені* – складаються з окремих частин, які орієнтовані у напрямках, близьких до вертикальної осі цілика;
- г) *важкоструктурні*.

У межах ділянки цілики можуть розташовуватися:

а) *регулярно*, утворюючи необмежену періодичну послідовність однакових за своїми розмірами і формою міжкамерних і інших опорних елементів;

б) *періодично*, утворюючи необмежену періодичну послідовність опорних елементів, що мають різні розміри і форму на різних ділянках;

в) *безладно*, утворюючи безсистемну сукупність опорних елементів різних розмірів і форм.

Залежно від гірничотехнічних і гірничо-геологічних умов, застосовуваної технології видобутку цілики розробляють після відпрацювання основної частини корисної копалини або ж залишають у надрах. У першому випадку це вимагає особливої організації видобувних робіт і навіть застосування специфічних систем розробки; у другому – приводить до додаткових втрат корисних копалин. Задача раціонального використання надр зводиться до задачі оптимізації: як при дотриманні безпечних і екологічно прийнятних умов експлуатації родовища з одного боку, досягти найбільш повного його відпрацювання з іншого, забезпечивши при цьому мінімальні капітальні і експлуатаційні питомі витрати.

### Взаємодія ціликів і камер з породним масивом

Особливий інтерес представляє група ціликів, призначених для підтримки очисних просторів при камерних і камерно-стовпових системах розробки. Це найпоширеніший вид ціликів, в яких часом втрачається до 60...70 % корисного компоненту. Розрахункова схема камерної системи розробки в найпростішому її варіанті являє собою необмежену періодичну послідовність однакових за розміром і нарисом у плані ціликів, розділених камерами (рис. 1).

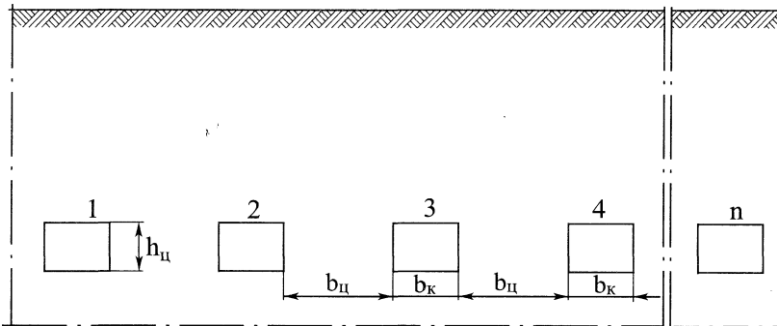


Рис. 1. Розрахункова схема камерної системи розробки

Очисні виробки і цілики являють собою єдину просторову систему в породному масиві, параметри якої взаємопов'язані і взаємообумовлені. З параметрами камер і ціликів пов'язані розміри області масиву порід, який втягується в процес деформування при виконанні очисних робіт. У зв'язку з цим для обґрунтованого визначення параметрів системи розробки (розмірів ціликів і камер), варто аналізувати напружено-деформований стан системи «цілик-камера-товщина порід».

Найчастіше в дослідженнях подібного роду в кожному конкретному випадку прагнуть знайти найбільш слабкий елемент, міцність якого визначає стан всіх інших, і, виходячи з його розмірів, визначити інші параметри системи розробки.

Зустрічаються умови, коли самим слабким елементом у системі розробки є ґрунт виробки і стійкість всього виробленого простору визначається станом і міцністю підстилаючих порід. Відомі випадки коли через нерівномірне вдавнення ціликів у ґрунт виникали небезпечні деформації порід покрівлі, які супроводжувались її трісканням. Наслідком цього може бути масове руйнування ціликів, яке може супроводжувалось обваленням кривлі.

Великий вплив на характер деформування породного масиву, що містить просторову систему «цілики-камери», робить співвідношення деформаційних і міцнісних властивостей порід, які складають кривлю, цілики і ґрунт очисних виробок. Дуже істотним також є характер і властивість контактів ціликів з кривлею і ґрунтом виробки.

Основними типами контактів ціликів з породами є:

- *повне зчеплення* (цілики та породи зі сторони ґрунту і кривлі являють собою одну породу);
- *неповне зчеплення* (на границі ціликів з породами кривлі і ґрунту мають місце менш міцні прошарки);
- *практично повна відсутність зчеплення* (на границі ціликів з породами кривлі і ґрунту є прошарки пластичних порід).

Залежно від типу контакту міняється пружно-деформований стан ціликів і при тих самих розмірах його несуча здатність виявляється різною. На рис. 2 показаний характер деформування і розподілу вертикальних напружень у випадку повного контактного зчеплення (рис. 2, а) і наявності пластичного прошарку (рис. 2, б).

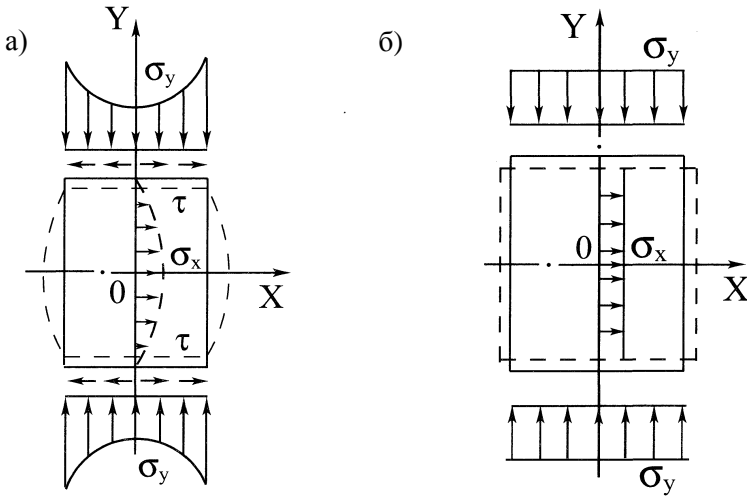


Рис. 2. Характер деформування і розподілення навантаження в ціликах при жорсткому (а) і пластичному (б) контактах з породами

Характер руйнування ціликів багато в чому визначається їх пружно-деформованим станом і структурою. При твердому зіткненні з породами в однорідних ціликах відбувається утворення так званих верхньої та нижньої пірамід з основами, які розміщені на площинах контакту (рис. 3, а). При наявності пластичних прошарків на контактній поверхні, руйнування ціликів відбувається з утворенням вертикальних тріщин і стовбчастих структур (рис. 3, б).

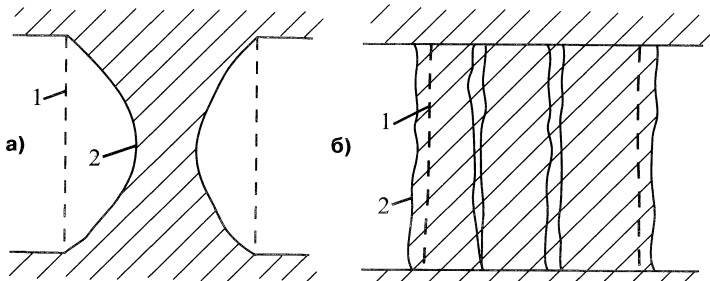


Рис. 3. Форми руйнування ціликів: 1 – вихідне зображення; 2 – зображення після деформування

### Розрахунок допустимої ширини міжкамernih ціликів

Задача визначення достатньої для заданих гірничотехнічних і гірничо-геологічних умов ширини міжкамernih ціликів складається

з трьох частин. Визначення навантаження на цілик починається з формулювання деякої гіпотези, яка дозволяє висловити припущення про те, що регулярно розміщені цілики при достатній їх кількості приймають вагу всієї маси налягаючих порід у границях площі виробленого простору:

$$p = SH\gamma, \quad (1)$$

де  $S$  – площа виробленого простору,  $H$  – глибина розміщення ціликів,  $\gamma$  – середньозважена об'ємна вага шарів порід над ціликами.

Це припущення покладено в основу методу розрахунку ціликів, запропонованого академіком Л.Д. Шев'яковим. За цим методом розміри ціликів визначаються, виходячи з уявлення, що вони працюють в умовах одновісного стиснення, а вертикальні напруження в будь-якому горизонтальному перерізі розміщенні рівномірно. При цьому фактичну нерівномірність розподілення вертикальних напружень у ціликах враховують введенням коефіцієнта запасу міцності.

Для стовбчастих ціликів, обмежених камерами з розмірами (рис. 4), ширину при його довжині  $d_u$  визначають за формулою:

$$\dot{a}_{\delta} = \frac{b_k + \frac{b_k \cdot b}{d_{\delta}}}{\frac{R_c}{ZH} - \frac{h_{\delta}\gamma_{\delta}}{H\gamma} - \frac{b}{d_{\delta}} - 1}, \quad (2)$$

де  $Z$  – коефіцієнт запасу міцності,  $H$  – глибина розміщення ціликів,  $\gamma$  – середньозважена об'ємна вага шарів порід над ціликами,  $d_u$  – довжина цілика,  $h_u$  – висота цілика.

В основі методу лежить уявлення про рівномірний розподіл вертикальних напружень по довільному горизонтальному перерізу цілика, яке справедливе лише для високих

ціликів, які знаходяться в межах  $\left(\frac{h_{\delta}}{a_{\delta}} > 2\right)$

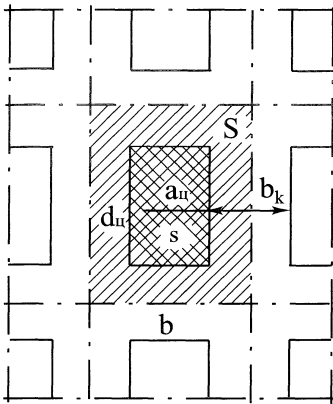


Рис. 4. Схема для визначення стовбчастих ціликів за Л.Д. Шев'яковим

дяться на ділянці видобутку.

Метод розрахунку ціликів В.В. Соколовського заснований на застосуванні теорії граничної рівноваги. Ідея методу полягає в тому, що спочатку визначають таке навантаження  $P_{AD}$  на середній переріз цілика  $AD$ , при якому він переходить у стан граничної рівноваги, а потім порівнюють отримане значення з вагою стовпа порід над ціликом, тобто з максимально можливим навантаженням, і одержують коефіцієнт запасу міцності (рис. 5).

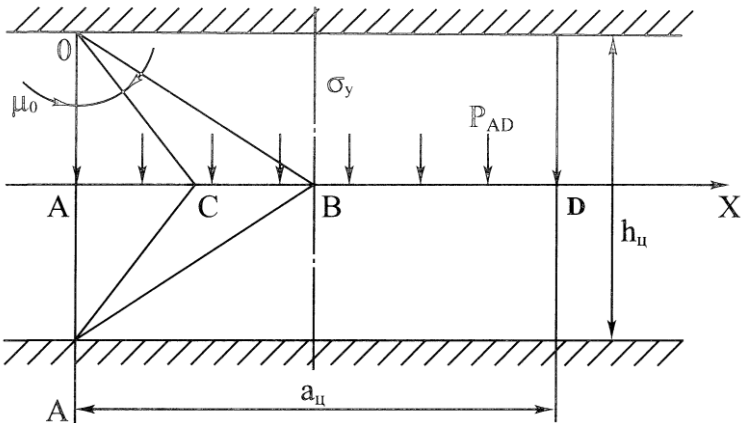


Рис. 5. Схема визначення напруження в цілику за В.В. Соколовським

За значенням останнього судять про відповідність обраних розмірів цілика умовам його роботи.

У випадку високих ціликів ( $\dot{a}_{\delta} \ll h_{\delta}$ ) рішення задачі про визначення навантаження на середній переріз цілика отримується у виді:

$$P_{AD} = 2a_{\delta}[r_0] \cdot \left( \arctg \frac{a_{\delta}}{2h_{\delta}} + \frac{2h_{\delta}}{a_{\delta}} \sin^2 \mu_0 \right) - a_{\delta}D, \quad (3)$$

де  $D = [r_0] \text{ctg} \rho$ ,  $r_0$  – зчеплення порід у цілику,  $\rho$  – кут внутрішнього тертя.

Розрахунковий параметр  $\mu_0$  визначається з рівняння:

$$[r_0] = (2\mu_0 - \sin^2 \mu_0) \cdot D. \quad (4)$$

При  $a_{\delta} > h_{\delta}$  ширина цілика може бути отримана тільки шляхом



чисельного інтегрування на ділянці перерізу AD.

Задача визначення міцних розмірів ціликів в іншій постановці була вирішена К.В. Руппенейтом. Руйнує (граничне) навантаження на цілик визначається з рішення відповідних задач теорії пружності з урахуванням паспортів міцності порід, що складають цілик. Діюче навантаження визначається за методом Л.Д. Шев'якова. Далі діюче навантаження порівнюється з граничним і встановлюється, як у методі В.В. Соколовського, коефіцієнт запасу міцності.

Слід зазначити, що навантаження на цілик, що визначається за методом Л.Д. Шев'якова, завжди є максимальним і тому йде в запас міцності.

При розрахунках ціликів велике значення приділяється обґрунтуванню коефіцієнта запасу міцності. У розрахунках його величина залежно від розв'язуваних задач приймається рівною 1,8...3,0.

Аналізуючи відомі методи розрахунку міцних розмірів ціликів, слід зазначити, що всі вони в підсумку пропонують залежності, в яких обумовлена ширина ціликів залежить від ширини примикаючих камер. Природно припустити, що проліт камери повинен мати обмеження, які в свою чергу, позначаються і на розмірах цілика. У зв'язку з цим проблема оцінки міцності незакріпленої кривлі камер (потолочини) має не менш важливе значення, чим визначення ширини цілика.

### **Метод розрахунку міжкамерних ціликів систем розробки методом свердловинного гідровидобутку**

Специфікою методів свердловинного гідровидобутку є використання в якості робочого агенту води, яка здатна переводити корисний компонент на місці залягання в рухомий стан.

Використання систем розробки теоретично можливе до глибини, на якій величина гірського тиску стає рівною міцності масиву гірських порід на стиснення:

$$H \leq H_{\text{аа}} = \frac{\sigma_{\text{cm}} \cdot K_{\phi}}{\gamma}, \quad (5)$$

де  $H_{\text{аа}}$  – гранична глибина використання систем;  $\sigma_{\text{cm}}$  – межа міцності порід на стиснення;  $\gamma$  – густина порід;  $K_{\phi}$  – коефіцієнт форми цілика: для зіркового цілика  $K_{\phi}=0,7$ ; для стрічкового –  $K_{\phi}=1,0$ .

При середніх значеннях межі міцності порід на стиснення  $\sigma_{cm}=22,5 \cdot 10^5$  Па і густині порід  $2,08 \cdot 10^4$  т/м<sup>3</sup> критична глибина використання систем із залишенням стрічкових ціликів складає 108 м, систем з зіркоподібними ціликами – 76 м.

Результати моделювання були піддані математичному аналізу і на його основі встановлено зв'язок між граничним прольотом кривлі та глибиною розробки:

$$L_{np} = 471 \cdot H^{-0,76}. \quad (6)$$

Приведення в рухомий стан корисного компоненту здійснюється за допомогою робочого агента, який подається в камеру виймання за допомогою свердловинних гідромоніторів.

Видобувні гідромонітори і агрегати свердловинного гідровидобутку дозволяють виконувати розмив корисного компоненту секторами. Наприклад, якщо камера розроблюється одним свердловинним гідромонітором, то переріз її буде мати форму кола (рис. 6). Розробка камери чотирма взаємодіючими видобувними гідромоніторами призводить до утворення її контуру у вигляді зірки (рис. 7).

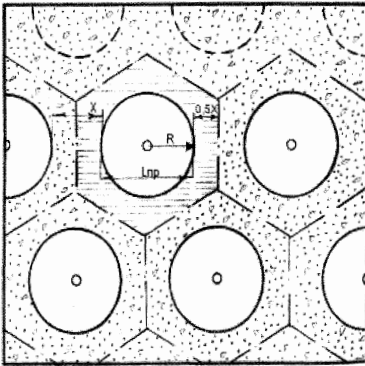


Рис. 6. Схема круглої камери виймання та міжкамерних ціликів

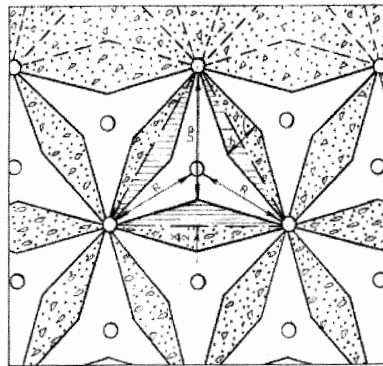


Рис. 7. Схема зіркоподібної камери виймання та міжкамерних ціликів

Для визначення показників повноти і якості видобутку корисних копалин використовують наступні коефіцієнти.

Коефіцієнт кількості видобутку виражає відношення видобутої

корисної копалини разом з перемішаною з нею породою  $D$  до кількості погашених при видобутку балансових запасів  $B$ :

$$\hat{E}_{\hat{\rho}^3 \hat{\rho}} = \frac{\hat{A}}{\hat{A}}. \quad (7)$$

Кількість видобутої корисної копалини разом з примішаними до неї підстилаючими породами можна встановити як суму об'ємів камери, зробленій у корисній копалині потужністю та діаметром  $L_{npi}$ .

$$V_{\hat{E}} = \frac{\pi \cdot L_{npi}^2}{4}. \quad (8)$$

Кількість погашених при видобутку балансових запасів визначається як сума об'ємів: камери, зробленій в корисній копалині і цілика, який припадає на вийомочну камеру ( $V_u$ ). Відповідно, у випадку виконання міжкамерних ціликів у корисній копалині, за економічними критеріями, які не підлягають обробці,  $K_{kil}$  виразиться залежністю:

$$\hat{E}_{\hat{\rho}^3 \hat{\rho}} = \frac{V_k - V_p}{V_k + V_{\delta}}. \quad (9)$$

Коефіцієнт зміни якості – відношення вмісту корисного компоненту у видобутій корисній копалині  $Q$  і в погашених балансових запасах  $Q_l$ .

$$K_{\hat{\rho}} = \frac{Q}{Q_l}. \quad (10)$$

Коефіцієнт видобутку з надр виражає відношення кількості видобутого корисного компоненту  $D$ , до кількості корисного компоненту, який був включений у підрахованих балансових запасах  $B$ :

$$K_t \frac{\hat{A}}{\hat{A}} = \hat{E}_{\hat{\rho}^3 \hat{\rho}} \cdot \hat{E}_{\hat{\rho}}. \quad (11)$$

Структурною одиницею ділянки родовища, на якому можна провести оцінку  $K_{kil}$ ,  $K_k$  і  $K_n$  є прямокутник ABCD (рис.8), який

включає дві камери виймання і об'єм корисної копалини який втрачається (знаходиться між контурами камер).

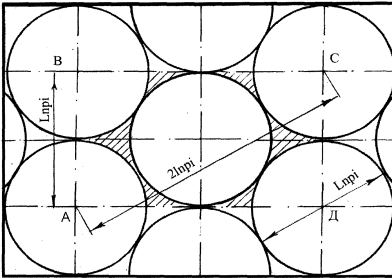


Рис. 8. Схема для розрахунку  $K_{кит}$ ,  $K_к$ ,  $K_n$  круглих камер

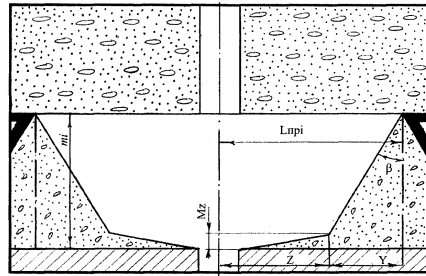


Рис. 9. Схема для розрахунку  $K_{кит}$ ,  $K_к$ ,  $K_n$  камер для глибин  $H > 50$  м талих родовищ

На рис. 9. зображена схема для визначення економічних показників у діапазоні глибин розробки вище 50 м.

Для інженерних методів розрахунку рекомендується використовувати формулу визначення примішаного об'єму підстилаючих порід:

$$V_p = \frac{\pi(L_{npi} - 2m \cdot \text{tg}\beta)^2}{2} M_z. \quad (11)$$

## Тема 12. Лекція 15. СТІЙКІСТЬ УСТУПІВ І БОРТІВ КАР'ЄРІВ

При розробці родовищ корисних копалин відкритим способом особливе значення має проблема стійкості породних відкосів – уступів і бортів кар'єрів. Положення відкосу характеризується, насамперед, кутом нахилу його поверхні до горизонтальної площини. Якщо в проекті будівництва кар'єру закладені завищені значення кутів нахилу відкосів, це може привести до порушення їхньої стійкості і викликати раптові руйнування уступів чи бортів кар'єрів. При занижених же значеннях кутів нахилу породних відкосів і великій глибині кар'єру виникає проблема економічної доцільності розробки родовища відкритим способом. Так, наприклад, на кар'єрах глибиною до 300 м зменшення результуючого кута

нахилу борта на  $3...4^\circ$  приводить до збільшення об'єму вскриши до  $10...11$  млн.  $m^3$  на 1 км фронту робіт .

### **Форми прояву зрушення порід при відкритій розробці**

У міру оснащення гірської промисловості новими могутніми технічними засобами все більша кількість родовищ відпрацьовується відкритим способом. Глибина відкритої розробки окремих родовищ перевищила 300 м. Будують і експлуатують кар'єри, розраховані на глибину розробки 500 м і більше. Технологія відкритої розробки родовища і параметри системи розробки значною мірою визначаються особливостями зрушень і деформацій гірських порід у кожних конкретних умовах.

Деформації порід у кар'єрі починаються відразу ж після утворення відкритої гірської виробки і відбуваються практично протягом всього терміну служби. Розрізняють неперервні і циклічні процеси. До неперервних, що відбуваються з практично постійною швидкістю, відносять осідання, осипи, суфозійні і поверхневі опливання, до циклічних, що відбуваються з перемінною швидкістю – зсуви, обвалення і т. д. Найбільшу небезпеку представляють циклічні процеси.

Для правильного проектування і ведення гірських робіт не обхідно знати форми прояву процесів зрушення і вміти прогнозувати характер їхнього розвитку та можливі наслідки. Необхідно також надійно визначати міри і розраховувати основні параметри (форма уступів і бортів кар'єрів, їхня висота), що забезпечують стійкість уступів, бортів і відвалів у період розробки.

Розглянемо основні форми прояву процесів зрушень на кар'єрах.

*Оповзень* – повільний зсув мас гірських порід, що складають відкіс (а іноді і його основу), який відбувається у виді ковзного руху між породами, які зміщуються, і нерухомим масивом. Це найбільш розповсюджений і великий вид порушення стійкості відкосів, пов'язаний з наявністю в товщі порід пластичних прошарків шарів і слабких контактів. Зсуви відбуваються при кутах нахилу, бортів і відкосів уступів пологіше  $25...35^\circ$ . Активна стадія зсувів протікає протягом значного часу (від декількох годин до місяців). Оскільки зсуви нерідко втягують у рух значні маси гірських порід (до декількох мільйонів кубічних метрів), вони часто є причиною повного припинення робіт у кар'єрах.

Розвиток зсуву супроводжується утворенням тріщин відриву, розміри яких характеризуються глибиною їхнього поширення, шириною розкриття і довжиною. По швидкості розвитку тріщин можна судити про хід деформації, що розвивається. Її називають іноді швидкістю «підвигання» блоку, що відривається.

*Обвалення* – швидкий зсув породних мас чи блоків і пачок порід, які складають відкіс, що супроводжується дробленням частини масиву, що зміщується. Поверхня відриву порід, що обвалюються, як правило, збігається з різного роду структурними послабленнями масиву і має нахил, який перевищує кут внутрішнього тертя.

Тому після подолання сил зчеплення масив, що відірвався, не може втриматися на цій поверхні силами тертя і переміщується вниз до подошви відкосу. Активна стадія обвалення протікає практично миттєво, що становить велику небезпеку для людей і механізмів, які працюють на нижчележачих уступах. Обвалення виникають при кутах відкосів, що перевищують  $25...35^\circ$  і захоплюють іноді значні частини масивів гірських порід.

*Опливина* – переміщення у вигляді потоку насиченого водою до текучого стану деяких різновидів піщано-глинистих порід порушеної структури (пилуватих пісків і глин, лесоподібних суглинків і лесів), які розтікаються по площадках уступів під кутом  $4...6^\circ$  і менше. Опливини захоплюють значні обсяги порід, розвиваються дуже інтенсивно, часто набуваючи катастрофічний характер.

*Осип* – руйнування і зсув приповерхневої частини крутих відкосів. Осипи формуються протягом значного періоду часу (декількох років) і характерні для всіх типів гірських порід. Відомі випадки, коли осипи були джерелами утворення більш великих порушень стійкості: зсувів, оплинин.

*Просідання* – нерівномірне вертикальне опускання ділянок уступів і поверхні відвалів, складених високопористими пухкими породами природної і порушеної структури під впливом власної ваги, зволоження атмосферними опадами, динамічних навантажень і т.п.

При просіданнях, як правило, не утворюється суцільна поверхня ковзання. Звичайно це найменш небезпечний вид порушення стійкості, однак при певних умовах він може стати причиною серйозних порушень режиму роботи, аварій і травм.

Фільтраційні деформації, викликані підземними водами, поділяють на опливання, механічну суфозію і фільтраційний виніс вздовж

тріщин. Опливання зв'язане з переносом і перевідкладенням ґрунтових часток підземними водами, що впливають на відкіс в межах ділянки їх просочування. Найбільшого розвитку цей процес набуває в піщаних ґрунтах.

*Механічна суфозія* – це винесення дрібних частинок з масиву гірських порід під впливом гідродинамічних сил. Фільтраційний виніс вздовж тріщин носить ерозійний характер і розвивається в слабозцементованих породах з характерною тріщинуватістю.

### Основні положення методів розрахунку стійких відкосів і бортів кар'єрів

Напруження в масиві ґрунту, з якого формується відкіс, визначаються власною вагою порід і додатковим навантаженням від ваги машин, будівель і інших об'єктів, розташованих на борті відкосу. При збільшенні крутості відкосу відбувається ріст тангенціальних (здвигаючих) напружень і при досягненні ними величин, що перевищують межу опору зрушення порід, рівновага відкосу втрачається і відбувається його деформування по деякій поверхні зрушення. Основні види деформацій породних відкосів показані на рис. 1.

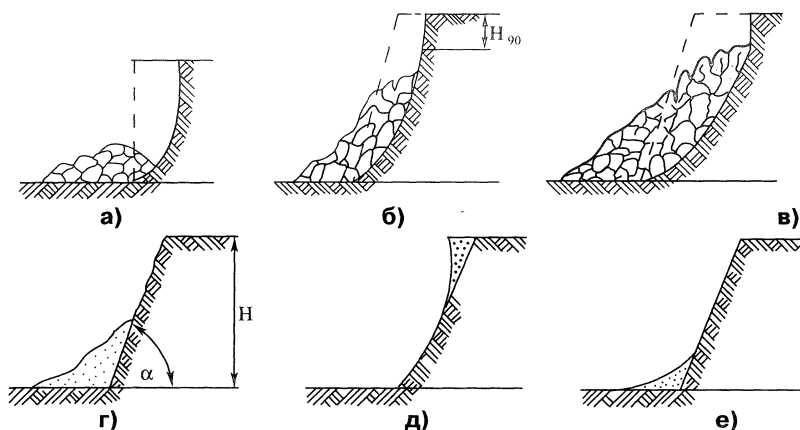


Рис. 1. Види деформацій породних відкосів : а) осипи, б) обвалення козирків, в) опливини, г) обвалення невисоких уступів ( $H < H_{90}$ ), д) обвалення високих уступів ( $H > H_{90}$ ), е) оповзні

Ґрунти, властивості яких крім кута внутрішнього тертя визначаються ще і зчепленням, допускають можливість існування вертикального відкосу. Найбільша висота такого відкосу може бути визначена за формулою В.В. Соколовського – І.А. Симвуліді:

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma} \operatorname{ctg} \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right), \quad (1)$$

де  $c$  і  $\rho$  – зчеплення і кут внутрішнього тертя порід відкосу,  $\gamma$  – об'ємна вага.

Для збереження стійкості відкосу при збільшенні висоти уступу зменшують кут нахилу відкосу. У природних умовах на висоту і кут закладення відкосу впливають міцність порід, ступінь їх тріщинуватості і шаруватості, положення площин тріщин і шаруватості, положення площин тріщин і нашарувань по відношенню до відкосу, режим ґрунтових вод, технологічні фактори.

### Методи розрахунку відкосів, оснований на гіпотезі плоскої поверхні зсування

П.М. Цимбаревичу належить одне із перших рішень задачі з визначення граничної висоти нахиленого уступу. Розрахункова схема приведена на рис. 2.

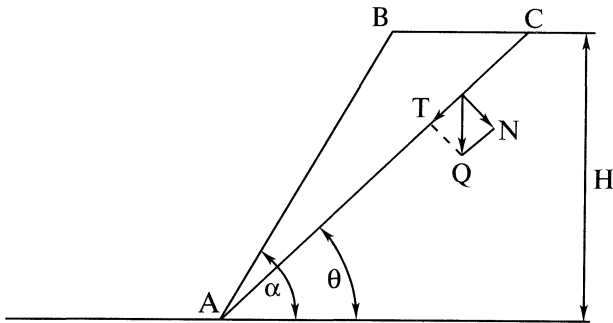


Рис. 2. Схема для розрахунку стійкої висоти уступу за П.М. Цимбаревичем

Допускається, що однорідний масив має опір порід розриву, рівний нулю.

Зрушення блоку ABC шириною рівною одиниці відбувається по площині, AC – слід цієї площини. Здвигаючою є проекція сили ваги T призми ABC на лінію AC, утримуючими – сили зчеплення C і тертя  $Ntg\rho$  вздовж лінії AC.

У загальному вигляді умова рівноваги порід по поверхні здвигання AC має вигляд:



$$Q \sin \theta = Q \operatorname{ctg} \rho \cos \theta + Cl, \quad (2)$$

де  $l$  – довжина сковзання АС,  $\theta$  – кут нахилу поверхні ковзання.

Визначимо величини, які входять у формулу (2):

$$Q = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{ctg} \alpha); \quad l = \frac{H}{\sin \theta}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу відкосу поверхні.

Підставляючи у рівняння (2) значення складових величин (3) отримаємо:

$$\frac{1}{2} \gamma H (\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{ctg} \alpha) (\sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \rho) = \frac{c}{\sin \theta}. \quad (4)$$

Виконуємо наступні перетворення:

$$\operatorname{ctg} \theta - \operatorname{ctg} \alpha = \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \cdot \sin \theta}; \quad \sin \theta - \cos \theta \operatorname{tg} \rho = \cos \theta \frac{\sin(\theta - \rho)}{\cos \theta \cdot \cos \rho}.$$

Із врахуванням даних залежностей отримуємо рівняння рівноваги:

$$\frac{1}{2} \gamma H \frac{\sin(\alpha - \theta)}{\sin \alpha \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\sin(\theta - \rho)}{\cos \rho} = \frac{c}{\sin \theta}. \quad (5)$$

Розв'язуючи рівняння відносно  $H$ , отримаємо:

$$H = \frac{2C}{\gamma} \cdot \frac{\sin \alpha \cos \rho}{\sin^2(\alpha - \rho)}, \quad (6)$$

де  $C$  – сила зчеплення,  $\gamma$  – об'ємна вага.

Для вертикального відкосу, коли  $\alpha=90^\circ$ , отримаємо:

$$H_{90} = \frac{2C}{\gamma} \cdot \frac{\cos \rho}{\sin^2\left(\frac{90^\circ - \rho}{2}\right)}. \quad (7)$$

Залежності (1) і (7), отримані на основі розрахункових схем, які відрізняються, схожі за структурою. Однак значення величини  $H_{90}$ , знайдене за формулою (7), приблизно вдвічі перевищує ті значення,

які визначені за формулою (1). Слід відмітити, що в практичних розрахунках використовують за звичай залежність В.В. Соколовського – І.А. Симбуліди, оскільки з усіх відомих співвідношень вона дає найменше значення висоти вертикального оголення.

### **Методи розрахунку відкосів, засновані на гіпотезі криволінійної поверхні здвигання**

Методи розрахунку відкосів, засновані на криволінійній поверхні здвигання, можна поділити на дві групи. До першої відносяться методи, в яких форма поверхні здвигання визначається у ході вирішення задачі.

У методах другої групи криволінійна форма поверхні приймається заздалегідь, а сам метод зводиться до алгоритму побудови цієї поверхні. Однією з перших у цій області була робота К. Терцагі.

Об'єм породи, розміщений між поверхнею оголення відкосу і поверхнею можливого ковзання, називають *призмою можливого обвалення*. Здвигання сили на поверхні можливого ковзання обумовлюються, в основному, вагою порід призми обвалення.

Для оцінки стійкості відкосу в масиві відшукують найбільш слабку поверхню, де утримуючі сили  $\sum F_i$  знаходяться по відношенню до здвигаючих сил  $\sum T_i$  у найбільш несприятливому відношенні. Форма поверхні можливого ковзання залежить від багатьох факторів – механічної міцності масиву, тріщинуватості, шаруватості і т.п.

Метод Ю.М. Соловйова заснований на прийнятті моделі гіпотетичного ґрунту, особливістю якої є припущення про те, що у вертикальних площинах породного масиву відсутні нормальні напруження а, отже, між вертикальними блоками, на які умовно розбита призма можливого обвалення, відсутні сили тертя. Задача зводиться до визначення екстремальної поверхні здвигання, тобто такої поверхні, вздовж якої опір зрушенню буде найменшим. Розрахункова схема приведена на рис. 3.

Розглядається умова рівноваги точки  $m$ , яка лежить на екстремальній поверхні здвигання:

$$dT_i - dF_i = a, \quad (8)$$

де  $a$  – деяка дуже мала величина.

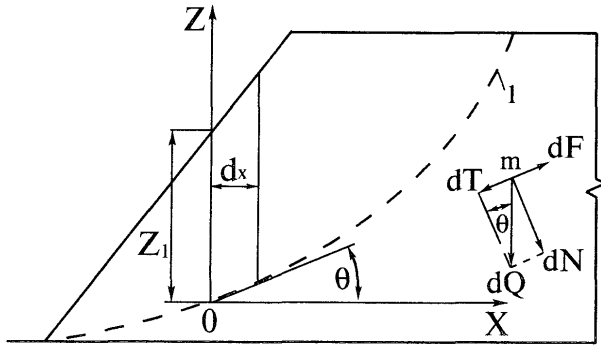


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення положення екстремальної поверхні здвиження

Визначимо величини, що входять у рівняння (8):

$$dT_i = \gamma Z_i \sin \theta dx, \quad dF_i = \gamma Z_i \cos \theta dx. \quad (9)$$

З врахуванням (9) рівняння рівноваги (8) набуде вигляду:

$$\gamma Z_i (\operatorname{tg} \cos \theta - \sin \theta) dx + C \frac{dx}{\cos \theta} = a. \quad (10)$$

Визначимо кут нахилу поверхні здвиження таким чином, щоб величина  $a$  була мінімальною. Для цього продиференціюємо рівняння (10) один раз по змінній  $\theta$  і прирівняємо отриманий вираз до нуля:

$$\frac{da}{d\theta} = -\gamma Z_i (\operatorname{tg} \rho \sin \theta + \cos \theta) dx + \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} dx = 0. \quad (11)$$

Одержимо рівняння екстремальної поверхні здвиження:

$$\frac{C}{\gamma Z_i} = (\operatorname{tg} \rho + \operatorname{ctg} \theta) \cdot \cos^2 \theta. \quad (12)$$

Для побудови поверхні зрушення за цим методом, який часто називають *методом відскоків*, необхідно знати початкове значення  $Z_i$  і від точки до точки визначати екстремальне положення поверхні здвиження.

К. Терцаги вперше був запропонований так званий графоаналітичний метод, суть якого полягає в припущенні, що поверхня зру-

шення є кругло циліндричною.

Розрахунок проводиться методом наближення, суть якого в повторенні розрахунків для декількох можливих поверхонь ковзання. Найбільш небезпечною (екстремальною) буде поверхня, для якої коефіцієнт стійкості буде мінімальним.

Для забезпечення стійкого положення відкосу мінімальний коефіцієнт стійкості повинний бути не меншим 1,5. Якщо він виявиться меншим, необхідно зробити відкіс більш пологим і повторити розрахунки.

Сутність методу полягає в наступному. На розрізі відкосу, який викреслюється у визначеному масштабі, наноситься ряд можливих циліндричних поверхонь ковзання (рис. 4, а), кожна з яких забезпечує визначений, поки невідомий, коефіцієнт запасу міцності  $k_i$ . Довжина можливих поверхонь ковзання вздовж фронту робіт приймається рівною одиниці. Кожна з призм ковзання розбивається на вертикальні відсіки однакової ширини  $b$  (рис. 4, б). Взаємодія між відсіками відсутня.

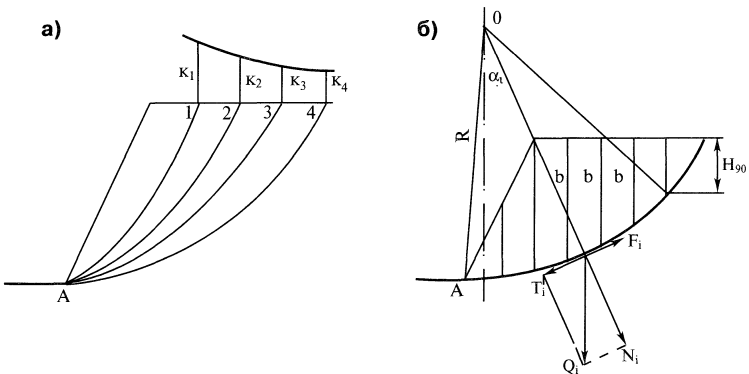


Рис. 4. Схеми для розрахунку стійкості відкосів за К. Терцагі

Вага кожного з відсіків  $Q_i$  розкладається на складові:

$$T_i = Q_i \sin \alpha \quad \text{і} \quad N_i = Q_i \cos \alpha.$$

Для визначення коефіцієнта стійкості  $k_i$  відкосу розглядають співвідношення моментів сил, що діють відносно точки О:

$$k = \frac{M_y}{M_c}, \quad (13)$$

де  $M_y$  – момент сил, що утримують відкіс від сповзання;  $M_c$  – момент сил, що здвигають відкіс.

Момент сил, що утримує відкіс, рівний:

$$M_y = ClR + \sum_i^n N_i tg \rho R, \quad (14)$$

де  $C$  – зчеплення,  $\rho$  – кут внутрішнього тертя,  $l$  – довжина дуги,  $R$  – радіус поверхні ковзання.

Момент сил, який здвигає відкіс рівний:

$$M_c = \sum_i^n T_i R. \quad (15)$$

Із врахуванням отриманих співвідношень отримаємо формулу для визначення коефіцієнта стійкості відкоосу:

$$k = \frac{Cl + tg \rho \sum_i^n Q_i \cos \alpha_i}{\sum_i^n Q_i \sin \alpha_i}. \quad (16)$$

Графоаналітичний метод К.Терцаги дає позитивні результати для порівняно однорідних і необводнених порід.

### **Протизсувні заходи на кар'єрах**

Провідну роль у боротьбі із зсувами варто відвести профілактичним заходам, тому що запобігти зсуву значно легше, безпечніше і дешевше, ніж боротися з ним, коли він виникне. До профілактичних заходів варто віднести:

а) ретельне вивчення геологічних і гідрологічних умов залягання гірських порід, їхньої міцності, структурних і інших особливостей ділянки родовища;

б) максимально повний облік умов залягання, властивостей порід і особливостей родовища при розрахунку стійкості бортів кар'єрів і складанні проекту гірських робіт;

в) чітке здійснення проекту в природі, особливо частини запроєктованих параметрів кар'єру (кутів відкоосу бортів і уступів);

г) якісне і своєчасне виконання дренажних робіт, у тому числі глибинного дренажу порід, що складають відкоси, дренажу земної поверхні у межах кар'єра і поверхні його бортів;

д) організацію систематичних маркшейдерських і гідрогеологічних спостережень, регулярний відбір проб та їх дослідження, уточнення місцезнаходження структурних поверхонь послаблення масиву, аналіз отриманих даних і оперативне коректування прийнятих у проєкті параметрів кар'єру, технології і порядку ведення гірських робіт.

При виконанні зазначених заходів, як правило, вдається запобігти зсувам чи звести до мінімуму їхні шкідливі наслідки.

Для боротьби зі зсувами запропоновані різноманітні механічні і хімічні способи закріплення земляних мас, способи їх заморожування і цементації. Але в практиці гірської справи вони широкого застосування поки не знайшли в зв'язку з тим, що є досить дорогими і недостатньо ефективними. Досвід показує, що ефективність боротьби зі зсувами багато в чому залежить від того, наскільки надійно встановлені причини виникнення зсувів і наскільки вчасно розпочаті роботи з їх ліквідації.

Оскільки найбільш часто причинами порушення стійкості відкосів на кар'єрах, складених глинистими і піщано-глинистими породами, є обводнювання цих порід і зниження їхніх міцнісних характеристик, то основні міри боротьби зі зсувами в цих умовах полягають в ефективному дренажі, забезпеченні стоку поверхневих вод.

Для забезпечення стійкості відкосів на кар'єрах, складених скельними і напівскельними породами, застосовують:

а) відповідну технологію ведення буровибухових робіт у приконтурних зонах (мікроуповільнене висадження свердловин у блоці);

б) штучне зміцнення послаблених ділянок. Основним джерелом обводнювання розроблюваних корисних копалин і порід розкриття в багатьох випадках є атмосферні опади. Для забезпечення стоку води із земної поверхні роблять планування поверхні, додаючи їй похил у бік дренажних канав, що захищають кар'єр від дощових вод. Для стоку дощових і талих вод із площадки уступів проводять поздовжні і поперечні канавки, а площадці уступу надають відповідний похил (не менше 5%).

Глибинний дренаж захищає відкоси від великих зсувів, що виникають при похилому заляганні слабких та середньої міцності

порід. Відкритий дренаж застосовують: при розкритті родовищ, складених слабкими породами, якщо товща водоносних порід являє собою один водоносний горизонт або якщо водоносний горизонт залягає в підшві розроблювального шару корисної копалини; при дренаванні слабообводнених горизонтально залягаючих водоносних горизонтів і міцних тріщинуватих порід.

Штучне зміцнення відкосів уступів, складених скельними і напівскельними породами, застосовують звичайно в тих випадках, коли треба втримати від сповзання чи обвалення окремі ділянки відкосів уступу, послаблені інтенсивною тріщинуватістю, несприятливо розташованими тріщинами, слабкими контактами між шарами порід і ін. Зміцнення здійснюють шляхом механічного утримання призми обвалення за допомогою штангового кріплення, шпунтів, залізобетонних паль і гнучких тросових тяжей, шляхом ін'єкцій у масив зміцнювальних розчинів (переважно цементної сполуки), шляхом ізоляції порід, схильних до інтенсивного вивітрювання, або дефляції, за допомогою стійких покриттів (набризкбетону, бітуму, епоксидних та інших смол). Іноді для зміцнення призми обвалення застосовують підпірні, захисні стінки.

При зміцненні відкосу штанговим кріпленням для запобігання від випадання блоків тріщинуватих порід і поліпшення спільної роботи штанг під шайби голівок штанг підкладають швелери чи залізобетонні диски, а штангам дають натяг, що підсилює тертя на поверхнях послаблення.

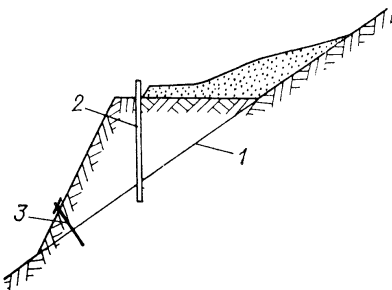


Рис. 5. Берма відкосу, укріплення штангою та залізобетонним зв'язком: 1 – слабкий контакт, по якому можливе сповзання; 2 – залізобетонний зв'язок; 3 – штанга.

Механічні способи зміцнення слабких ділянок відкосів часто застосовують у комплексі. На рис. 5 приведена схема зміцнення берми штангами і залізобетонними пальями на ділянці слабого контакту, по якому можливе сповзання.

Для боротьби зі зсувами в кар'єрах застосовують і такі способи, як зняття навантаження з відкосу, залишення ціликів і ін.

## **Тема 13. Лекція 16. ДИНАМІЧНІ ЯВИЩА В МАСИВАХ ПОРІД ПІД ВПЛИВОМ РОЗРОБКИ**

### **Гірські удари**

Поряд із статичними формами проявів гірського тиску, у масивах гірських порід можуть відбуватися динамічні, раптові руйнування ділянок, що знаходяться у визначених умовах напруженого стану при великих діючих напруженнях. У природній геологічній обстановці до подібних динамічних явищ у земній корі відносяться землетруси. При виконанні ж гірських робіт такими є гірські удари і раптові викиди газу і порід.

Гірський удар являє собою явище крихкого руйнування гранично напруженої ділянки масиву (крайньої частини біля виробки або цілика), при якому відбуваються інтенсивне дроблення і викид породи чи розроблювальної корисної копалини у виробку, порушення кріплення, зсув, що спричинює в ряді випадків пошкодження видобувних машин і устаткування. Удар супроводжується сейсмічними коливаннями в навколишньому масиві, різким звуком, повітряною хвилею і утворенням пилу.

Як правило, гірському удару передують посилення тиску на кріплення і цілики, а після удару підсилюється гірський тиск на суміжних ділянках. У ряді випадків перед гірським ударом відбувається спучування ґрунту і видавлювання порід у виробку.

Перші відомості про гірські удари, що відбулися на олов'яних рудниках Англії, відносяться до 1738 р. У другій половині XIX ст. гірські удари стали відбуватися при розробці вугільних родовищ у країнах Західної Європи.

Гірські удари є найбільш небезпечним проявом гірського тиску, що вносять серйозні порушення виробничого процесу, а в деяких випадках приводять до катастрофічного виходу з ладу не тільки великих видобувних ділянок, але і цілих шахт та рудників та до трагічної загибелі багатьох людей. Тому вивчення причин, умов і механізму гірських ударів та розробка ефективних способів їх прогнозування і мір їхнього попередження і локалізації є найважливішою задачею механіки гірських порід, актуальність якої увесь час підвищується у зв'язку з ростом глибин розробки корисних копалин.



## Класифікація гірських ударів

Запропоновано декілька класифікацій гірських ударів, основаних на різних ознаках. Найбільший інтерес представляють три класифікації.

Одна з них передбачає поділ гірських ударів за фізичною ознакою. За цією ознакою гірські удари поділяють на три типи. Удари першого типу називають *ударами тиску*. При таких ударах цілики корисної копалини або породи вибухають подібно тому, як це відбувається при вибухоподібному руйнуванні під пресом міцного зразка породи при навантаженні, яке перевищує межу міцності даної породи.

Удари другого типу називають *шокowymi гірськими ударами*. Їхньою причиною є раптове прикладення навантаження.

Шоківі удари можливі у випадку, якщо над корисними копалинами залягають потужні міцні покриваючі породи. Спочатку вони консольно зависають над ціликом, навантажуючи і зацімлюючи його. При досягненні ж певного прольоту відбувається злам і обвалення завислих порід, і при цьому виникає хвиля тиску, яка викликає миттєве руйнування гранично напруженого цілика.

Удари третього типу – *удари ламання*. Причиною таких ударів є наявність у товщі вище безпосередньої кривлі чи нижче безносереднього ґрунту прошарку пластичної породи, наприклад прошарку глини, вкладеного між твердими породними шарами. У відповідних умовах цей прошарок видавлюється у бік виробки і ламає твердий шар кривлі (чи ґрунту) виробки у формі гірського удару.

Інша класифікація дозволяє виділяти різні класи гірських ударів за енергетичною ознакою – кількістю сейсмічної енергії, що виділяється при ударі, – і відповідно за ступенем і обсягом руйнування при цьому корисної копалини і порід, кріплення, устаткування. За енергетичною ознакою доцільно розрізняти п'ять класів гірських ударів: мікроудари, відносячи до них стріляння гірських порід і поштовхи, слабкі, середні, сильні і катастрофічні удари. У табл. 1 приведені дані про сейсмічну енергію ударів кожного класу і їхню сейсмічність в епіцентрі.

Стріляння гірських порід являє собою крихке руйнування порід на поверхні гірської виробки, що проявляється у відскакуванні окремих шматків породи від забою, кривлі, чи ґрунту стінки виробки, від стінки цілика і супроводжується звуковим ефектом, подіб-

ним до пострілу.

Таблиця 1

Енергетичні характеристики ударів різних класів

Класи гірського удару	Сейсмічна енергія, Дж	Рівень сейсмічності в епіцентрі, бал
Мікроудари (стріляння, поштовхи)	<10	<1
Слабкі	10...102	1...2
Середні	102..104	2...3,5
Сильні	104...107	3,5...5
Катастрофічні	>107	>5

*Поштовх* – це локальне руйнування корисної копалини чи породи в глибині масиву без подрібнення і викиду. Поштовхи звичайно супроводжуються звуком, невеликим струсом масиву, а при достатній їхній силі також повітряною хвилею. Якщо поштовх відбувається у процесі дії робочого органу гірської машини, наприклад бара врубової машини чи долота бурового верстата, то він відчувається саме як поштовх на інструмент.

Таким чином, у класі мікроударів стріляння є поверхневим локальним руйнуванням, а поштовх – локальним руйнуванням у глибині масиву, при близьких значеннях енергетичних параметрів.

*Слабкий гірський удар* – це локальне руйнування і незначний викид корисної копалини у виробку з відчутним звуковим і сейсмічним ефектом, можливим утворенням пилу, але без суттєвого порушення кріплення та без пошкодження машин та обладнання.

*Середній гірський удар* спричиняє швидке крихке руйнування і викид чи видавлювання у виробку вже значного об'єму корисної копалини чи породи з великою кількістю пилу, утворення повітряної хвилі, порушення кріплення і завал виробок на ділянці довжиною до декількох метрів, зсув і пошкодження машин і обладнання.

*Сильний гірський удар* приводить до порушень кріплень і до завалів виробок з пошкодженням машин і обладнання на ділянці довжиною до декількох десятків метрів, що вимагає великих об'ємів відновлювальних робіт.

При *катастрофічних гірських ударах* відбувається спонтанне, у формі ланцюгової реакції, руйнування ряду ціликів, завал виробок у межах цілої ділянки чи горизонту рудника або шахти. Площа гірських виробок, що руйнуються при такому ударі, іноді досягає ба-

гатьох сотень тисяч квадратних метрів.

У третій класифікації види гірських ударів розрізняють за топологічною ознакою – місцем прояву ударів, що характеризує умови навантаження рудного тіла, шару чи порід за рахунок ефекту тиску опору. Тут розрізняють удари в ціликах, у крайніх частинах масиву, у виробках, пройдених по корисній копалині і у польових виробках.

Аналізуючи випадки гірських ударів у конкретних умовах родовища, району чи басейну, встановлюють фізичний тип, енергетичний клас і топологічний вид ударів, що спостерігалися, і намічають комплекс заходів для їх попередження, запобігання чи локалізації.

### **Прогноз і реєстрація гірських ударів**

При розвідці і розробці корисних копалин, будівництві підземних споруд важливе значення має прогноз гірських ударів. Він дозволяє правильно спроектувати об'єкт, передбачивши проходку основних виробок у неударонебезпечних породах і ділянках, вибрати відповідну систему розробки і способи проходки виробки.

Прогноз гірських ударів передбачає: а) виявлення ударонебезпечних гірських порід (у тому числі покладів чи пластів корисної копалини) і оцінку глибин, починаючи з яких дані породи стають ударонебезпечними; б) визначення ділянок можливого прояву гірських ударів; в) передбачення часу прояву гірських ударів.

На стадії розвідки родовища чи інженерно-геологічних пошуків порівняльна здатність гірських порід до нагромадження пружної потенційної енергії може бути визначена за допомогою механічних властивостей порід з використанням для цього бурових кернів. Для порід, потенційно схильних до гірських ударів, залежності навантаження-деформація близькі до прямолінійних, тобто діють за законом Гука в інтервалі навантаження зразків практично аж до їхнього руйнування. У породах, не схильних до гірських ударів, при випробуваннях спостерігається розвиток пластичних деформацій: залежності навантаження-деформація починаючи з деякого рівня напружень вирівнюються, тобто деформації ростуть швидше, ніж навантаження, закон Гука не виконується.

Оцінка ударонебезпечності порід на стадії розвідки носить самий попередній характер і не дає повністю об'єктивних і однозначних результатів. Більш надійний прогноз ударонебезпечності може бути

здійснений на споруджуваному чи діючому об'єкті при проходці виробок і веденні видобувних робіт. При цьому об'єктивними ознаками ударонебезпечності є стріляння, поштовхи і слабкі гірські удари, що супроводжують виробничі процеси (буріння і висадження шпурів і свердловин, відбій молотками). Ці процеси, роблячи динамічний вплив на сильно напружену приконтурну частину масиву корисної копалини чи породи у випадку схильності даної породи до гірських ударів, по суті, провокують виникнення крихких мікроруйнувань у приконтурному масиві, що свідчить про наявність такого напруженого стану, який може за певних умов спричинити більш сильні гірські удари.

Відмічено, що стріляння, поштовхи і слабкі гірські удари, якщо вони в даній ситуації стали проявлятися, звичайно являють собою не одиничні явища, а серії однохарактерних явищ, які супроводжують певні видобувні процеси. Наприклад, стріляння в прохідних вибоях за звичай починається відразу після взривання чергового врубу і являє собою процес безперервного з короткими інтервалами відскакування плиток породи, яке відбувається в найбільш напруженій ділянці приконтурного масиву.

Зокрема, на рудниках ПО «Апатит» особливо інтенсивне стріляння порід спостерігається протягом першої півгодини після чергового висадження вибійних шпурів, потім інтенсивність процесу зменшується. На вугільних родовищах при бурінні, роботі врубових машин чи комбайнів на ударонебезпечних пластах поштовхи також відбуваються досить часто. Безпосередньої небезпеки для працюючих і для збереження обладнання вони самі по собі звичайно не представляють, а іноді на таких ділянках видобувні процеси навіть полегшуються.

За своєю фізичною природою стріляння, поштовхи і слабкі удари аналогічні форшокам, які передбачають землетруси, тобто це явища крихких мікроруйнувань, які свідчать про високий рівень пружних напружень у масиві і потенційної ударонебезпеки.

Іншим передвісником гірського удару, причому найбільш вивченим, є зміна сейсмоакустичної активності масиву, тобто зміна числа природних сейсмоакустичних (переважно звукових) імпульсів у масиві гірських порід, пов'язаних з мікроруйнуваннями під впливом зростаючих напружень у відповідних частинах масиву. На реєстрації й аналізі цих імпульсів заснований сейсмоакустичний

метод прогнозу гірських ударів. Процес сейсмоакустичних спостережень містить у собі наступні операції: прийом природних імпульсів, посилення їх до визначеного рівня і передачу на реєстрацію, аналіз сейсмоакустичної активності.

Для прийому сейсмоакустичних імпульсів у різних точках масиву встановлюють сеймоприймачі (геофони), які сприймають і передають імпульси, що виникають у породі, по кабелю чи по радіо на пункт реєстрації. Реєстрацію ведуть на паперову чи магнітну стрічку або цифровим способом.

Найпростіший вигляд аналізу сейсмоакустичної активності – визначення числа імпульсів за одиницю часу. Ріст числа імпульсів свідчить про активізацію процесу мікроруйнувань.

Поряд з описаними ознаками ударонебезпеки проявляються і інші. Так, у вугільних пластах при ударонебезпечних ситуаціях збільшується вихід і міняється крупність штибу. Вихід штибу в перенапружених ділянках збільшується до 10 разів і більше, причому за рахунок крихких мікроруйнувань частинок вугілля на забої свердловини штиб утвориться більших розмірів.

Найбільшу складність представляє третій вид прогнозу-передбачення часу прояву гірських ударів. Мова тут йде про середні, сильні і катастрофічні удари, оскільки саме з такими ударами пов'язана основна небезпека і істотні порушення технологічного процесу.

Для прогнозу у районах і басейнах, небезпечних по прояву гірських ударів, звичайно створюють спеціальну службу інструментальних спостережень за ознаками, які сповіщають про гірські удари. Одним з основних показників, що реєструються інструментальними спостереженнями, є сейсмоакустична активність породного масиву. Її варіювання відповідає зміні напруженого стану порід. Звичайно перед гірським ударом сейсмоакустична активність різко зростає, а потім, за 30...40 хвилин до удару, практично зникає.

Найбільш надійним є прогноз, заснований на системі без перервного, постійного і своєчасного одержання і обробки інформації про місце, час і розвиток у просторі вогнищ динамічних явищ. Для такого оперативного контролю і прогнозу стану і поводження масиву гірських порід розроблені багатоканальні сейсмічні станції, оснащені міні-комп'ютерами. За допомогою цих станцій визначають координати місць зародження сигналів акустичної емісії в розроб-

лювальному масиві гірських порід і стежать за їх розподілом у процесі зміни напружено-деформованого стану масиву, який дозволяє одержувати необхідну інформацію про інтенсивність наростання і спаду мікросейсмічних явищ для своєчасного прогнозу часу, місця і сили очікуваного гірського удару.

Для спостережень і прогнозу гірських ударів застосовують також сейсмічні методи. Сейсмічні станції, створені в районах прояву гірських ударів, поряд із сейсмоакустичною апаратурою оснащують чутливими сейсмографами і нахиломірами. Розташовуючи пункти сейсмічних спостережень у різних точках шахтного поля або періодично складають карти мікросейсморайонування, які дозволяють виділяти на визначені періоди сейсмічно активні зони, у межах яких найбільш ймовірний прояв гірських ударів.

У випадку гірського удару сейсмічні спостереження дозволяють визначити координати в глибину гіпоцентру, тобто вогнища гірського удару, оцінити кількість сейсмічної енергії, встановити частотний спектр, тривалість, амплітуду і інші параметри сейсмічних коливань.

Оскільки в багатьох випадках гірські удари відбуваються в ціликах, залишених у виробленому просторі, на відпрацьованих горизонтах, пластах, жилах, куди немає безпосереднього доступу, такі спостереження дозволяють оцінювати не тільки параметри гірських ударів, що відбуваються, але і зміни ударонебезпечної ситуації внаслідок зміни в часі напруженого стану і рівня накопиченої потенційної енергії на різних ділянках шахтного поля.

### **Основні поняття про раптові викиди порід та газу**

Як і гірські удари, раптові викиди порід і газу також є формою динамічного прояву гірського тиску, які можуть бути класифіковані як газодинамічні явища. Сутність їх полягає в раптовому відділенні від забою і дробленні порід при одночасному виділенні значної кількості газу. Поток газу який виділяється при викиді, порода чи корисна копалина відкидається від вибою, а в масиві перед вибоєм виникає порожнина, заповнена здебільшого роздробленим матеріалом. Тривалість процесу раптового викиду складає звичайно від доль до декількох секунд; в окремих випадках вона може досягати декількох хвилин.

Таким чином, раптовий викид можна визначити як явище швид-

кого руйнування деякої привибійної ділянки масиву, що супроводжується інтенсивним дробленням породи, що руйнується, і відкиданням її у виробку з одночасним виділенням значної кількості газу.

Загальними характеристиками й ознаками раптових викидів є: утворення подрібненої породи, яка викидається на великі відстані від вибою; утворення язикоподібних порожнин, заповнених подрібненою породою; велика кількість газу, що виділяється при викиді; відносно невелике в порівнянні з гірськими ударами пошкодження кріплення.

Раптові викиди відбуваються при виконанні гірських робіт у вугільних пластах, у кам'яних, калійних і магнезійних солях. Основними газами, що виділяються при раптових викидах є метан, вуглекислий газ і азот. В одних випадках виділяється переважно який-небудь один із цих газів, в інших – їх суміш. Порожнини, утворені перед вибоєм в результаті раптового викиду, бувають різноманітної форми: найчастіше подовжені груше- або кармановидні, але іноді близькі до сферичної, розгалуженої, складної і неправильної конфігурації. Як правило, горловина порожнини буває значно вужчою, чим поперечний розмір центральної її частини.

Силу чи масштаб раптового викиду оцінюють за поперечними розмірами і об'ємом утворених порожнин, кількості викинутої породи в тоннах і кількості виділеного газу в кубічних метрах. Крім того, часто встановлюють коефіцієнт газовиділення, що представляє собою відношення кількості газу  $N$  у кубічних метрах, що виділився при викиді, до кількості роздробленого і викинутого породного матеріалу  $Q$  в тоннах:

$$n = \frac{N}{Q}. \quad (1)$$

З ростом масштабу викиду коефіцієнт газовиділення зростає. Значний інтерес також являє інтенсивність раптового викиду, тобто відношення кількості викинутого матеріалу  $Q$  чи газу, що виділився  $N$  до тривалості  $t$  процесу викиду:

$$I_n = \frac{Q}{t}. \quad (2)$$

$$I_{\bar{a}} = \frac{N}{t}. \quad (3)$$

За характером прояву розрізняють концентровані і розсіяні раптові викиди.

Концентровані викиди проявляються у межах шахтного поля чи розроблювального пласта в тому чи іншому ступені систематично, на більш-менш постійних відстанях один від одного в міру проведення виробок. Ці відстані називають в такому випадку кроком викидів. Розсіяні викиди проявляються нерівномірно по площі шахтного поля чи по простяганню пласта.

Число викидів на даній шахті чи руднику протягом року чи припадаючи на 1 млн. т видобутої корисної копалини або 100000 м<sup>3</sup> відпрацьованої площі називають *частотою раптових викидів*.

### **Умови виникнення раптових викидів і уявлення про їх механізм**

Умови виникнення раптових викидів досить різноманітні. Слід відмітити, що небезпека прояву раптових викидів, їх частота і сила зростають із збільшенням глибини гірських робіт і тиску газу, кута падіння порід і потужності розроблювальних пластів.

Сила раптових викидів в очисних виробках за звичай буває більшою ніж у підготовчих. Але найбільшу силу мають викиди, які відбуваються при вскриванні викидонебезпечних пластів чи покладів шахтними стволами.

Відмічено, що раптові викиди з наявністю вуглекислого газу, як правило перевищують по силі викиди за участю метану.

У більшості випадків розвиток раптових викидів пов'язаний з безпосереднім механічним впливом на корисну копалину чи породу: виконанням вибухових робіт, впливу на забій видобувного механізму чи інструменту. При цьому із збільшенням ступеня впливу небезпека викиду збільшується. Зазвичай викиди відбуваються через декілька секунд після динамічного впливу на вибій. Однак трапляються і викиди із запізненням, які відбуваються через триваліші проміжки часу після динамічного впливу, від декількох хвилин до декількох годин. В окремих випадках викиди відбуваються і за відсутності робіт у вибої чи при тривалій зупинці.



## Оцінка викидонебезпечності гірських порід і прогноз раптових викидів

Попередня оцінка викидонебезпечності і прогноз раптових викидів важливі для своєчасного прийняття відповідних проектних рішень і встановлення потрібних методів ведення гірських робіт на викидонебезпечних ділянках, пластах і шахтах.

Розрізняють три категорії методів прогнозу викидонебезпечності гірських порід: *регіональний*, *локальний* і *поточний*. При цьому регіональні методи спрямовані на виявлення викидонебезпечних пластів, шарів у родовищі, локальні – на виявлення і оцінку ймовірності виникнення динамічних проявів у межах видобувних ділянок.

Регіональні і локальні методи являють собою довготривалий прогноз. Поточні методи – вид короткочасного прогнозу, який заснований на вловлюванні і реєстрації передвісників раптових викидів, тобто його призначення полягає в оцінці і передбаченні викидонебезпечного стану конкретної ділянки пласта чи покладу, в передбаченні місця і часу раптового викиду.

*Регіональний прогноз* базується на зв'язку між геологічною характеристикою родовища і властивостями порід. У ньому використовують дані геологорозвідувальних робіт, результати вивчення механічних властивостей гірських порід по кернам із розвідувальних свердловин.

При регіональному прогнозі виявляють також наявність у кривлі і ґрунті покладу міцних шарів чи пластів порід, здатних зависати над очисним простором, створюючи високі концентрації напружень поблизу вибою.

Суттєве значення в регіональному прогнозі має характеристика гідрогеологічних умов. Із збільшенням вологості в породі викидонебезпечність знижується, оскільки в першу чергу зростає здатність породи до пластичної деформації і знижується здатність до крихкого руйнування. Крім того, адсорбування вологості веде до пониження сорбційної ємності по газу.

Дані регіонального прогнозу враховують на стадії проектування: при створенні комплексних проектів розвитку гірничо-видобувних районів, створенні проектів нових шахт.

*Локальний прогноз* включає у себе кількісні визначення міцних і пружних властивостей порід і їх зміни, експериментальне вимірювання діючих напружень і оцінку зміни напруженого стану

внаслідок мінливості гірничо-геологічних умов та під впливом гірських робіт, визначення тиску газу в порах, пористості, газопроникності, вологості.

*Поточний прогноз* раптових викидів заснований на візуальному і інструментальному вловлюванні передвісників раптових викидів, які часто проявляються за декілька секунд чи хвилин до викиду. Задачею поточного прогнозу є своєчасне попередження про перехід ділянки в небезпечний чи навпаки безпечний стан.

## **Тема 14. Лекція 17. СПОСОБИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ І БОРОТЬБИ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ДИНАМІЧНИМИ ПРОЯВАМИ ГІРСЬКОГО ТИСКУ В ШАХТАХ**

### **Загальні положення**

Міри попередження та боротьби з гірськими ударами і раптовими викидами значною мірою базуються на одних і тих же принципах, оскільки ці явища пов'язані з підвищеною напруженістю гірських порід.

До регіональних мір відносяться: випереджаюче відпрацювання захисних пластів (шарів, покладів); попередня дегазація масиву свердловинами; профілактичне зволоження чи розрихлювання пласта попереду очисних виробок чи на підготовчому горизонті. Локальними мірами є: обробка небезпечного масиву нагнітанням води в пласт під тиском у режимах гідророзрихлювання, гідровіджиму і гідророзриву; гідровимив порожнин і щілин.

Досвід показує, що найбільш радикальним є застосування регіональних мір, які дозволяють своєчасно виявити пласти, шари порід, поклади чи великі ділянки шахтних полів, небезпечні по гірським ударам чи раптовим викидам, передбачити проектом і здійснити на стадії розкриття і підготовки раціональні рішення, прийоми та послідовність ведення гірських робіт, які повністю б знищували небезпечні динамічні прояви гірського тиску і зводили їх до мінімуму.

### **Захист людей від гірських ударів і раптових викидів**

Небезпека динамічних проявів гірського тиску для людей, працюючих на шахті, полягає: в травмуванні і засипанні їх відкинутою масою корисної копалини, що видобувається; в травмуванні зруйнованого кріплення при безпосередній близькості від місця гірсь-

кого удару чи раптового викиду; в травмуванні під дією сильної повітряної хвилі при гірських ударах; в утворенні вибухової газоповітряної суміші при раптових викидах; у заповненні газом гірських виробок поблизу місця раптового викиду і утворенні бідної на кисень газоповітряної суміші; в порушенні нормальних умов вентиляції робочих місць внаслідок їх завалу при гірських ударах і раптових викидах. Залежно від масштабу гірського удару чи раптового викиду небезпека може погрожувати людям, які знаходяться в безпосередній близькості від вибою.

Важливе значення має ретельний інструктаж робочих про візуальні ознаки ударо- і викидонебезпеки, методи саморятування, передбачених планом ліквідації аварій.

Для можливого механічного захисту працюючих слід передбачати спеціальні кріплення, щити, захисні козирки та інші конструктивні методи, які можуть бути достатніми і досить ефективними, наприклад, при стрілянні гірських порід, поштовхах, мікроударах і невеликих викидах.

В особливо ударо- і викидонебезпечних умовах необхідно передбачати дистанційне управління гірськими машинами і механізмами та застосування безлюдних способів ведення очисних робіт і проходження виробок. Так, виймання вугілля комбайнами і врубовими машинами на небезпечних пластах і буріння шпурів (свердловин) при вийманні ціликів повинне проводитись з дистанційним включенням і виключенням механізмів на відстані не менше 15 м, при цьому наявність людей поблизу працюючих машин не допускається. При відпрацюванні ціликів буровибуховим методом наявність людей під час висадження і протягом 30 хв після цього також не допускається. Вони повинні знаходитися у цей час не ближче за 200 м від місця вибуху. Без постійної присутності людей у лаві повинні вестися роботи з виймання вугілля при переході очисними вибоями зон впливу ціликів вугілля.

При раптових викидах найбільш небезпечні умови в очисних виробках малопотужних крутих шарів: працюючі нижче ділянки викиду піддаються небезпеці травмування, ті що працюють вище цієї ділянки – небезпеці удушення газом. Тому в таких умовах передбачають запасні виходи через вироблений простір по спеціальних ходках, захищених бутовими смугами.

Протигазовий захист передбачає спеціальні заходи щодо швид-

кого відновлення нормальних умов вентиляції, подачі свіжого повітря в ізольовані обваленням чи викидом ділянки і застосування індивідуальних засобів захисту – саморятувальників.

### **Виймання ціликів, небезпечних по гірським ударам**

Виймання ціликів, небезпечних по гірським ударам, можна здійснювати способами, які виключають їх появу або такими способами, при яких гірські удари не виключаються, але забезпечується безпека робітників та безперерійність технологічного процесу.

Аналіз розподілення напружень у ціликах і практичний досвід показує, що найбільш небезпечними по гірським ударам є підготовчі і нарізні виробки, пройдені у межах відпрацьованих ціликів. Тому такі виробки слід використовувати тільки як вентиляційні або необхідно їх поглиблювати на повний переріз у ґрунт пласта чи покладу, що відпрацьовується. Відкаточні виробки необхідно розміщувати і підтримувати з боку виробленого простору, який оточує цілик. За допомогою бутових смуг можна зберігати виробки позаду очисного вибою.

Очисні роботи необхідно проводити суцільним фронтом, починаючи їх від крайніх частин ціликів, які під впливом тиску опору зазнали значних деформацій, часткове роздавлювання, внаслідок чого опорні навантаження перемістилися ближче до центральної частини ціликів. Таким чином, найбільш сприятливим є виконання очисних робіт по відпрацюванню ціликів від менш напружених до більш напружених їх ділянок.

Відбій корисної копалини слід проводити буровибуховим методом при одночасному вибуху по всьому вибою з метою провокування назріваючого гірського удару. Протягом 0,5...1 год після вибуху люди не повинні допускатися в район відпрацювання ціликів.

Виймання ціликів здійснюється після приведення виробок в неударнебезпечний стан на ширину  $(0,7...1)n$  і очисного вибою на ширину  $n+b$ , де  $n$  – ширина захисної зони,  $b$  – підвигання вибою на один чи декілька циклів між проведенням локальних дій. Ширину захисної зони за допомогою пласта  $m$  не менше 3 м можна визначити з виразу  $n=2m+1$ . За допомогою пласта більшого 3 м ширина захисної зони практично не змінюється і складає 7...7,5 м. Якщо довжина ціликів на всій довжині менша  $0,5l$  (де  $l$  – ширина зони

впливу опорного тиску, визначається за діючими нормативними документами чи за рекомендаціями), то виймання ціликів відбувається після їх профілактичної обробки на всій площі.

Не можна проводити відпрацювання ціликів у зонах впливу діючих очисних вибоїв, так як при цьому виникає додаткова небезпека гірських ударів за рахунок перерозподілу навантажень з сусідніх ділянок ведення очисних робіт.

Виймання штрекових ціликів слід проводити від раніше знайдених печей по простяганню пласта, а ціликів в нахилених виробках – у напрямку зверху вниз діагональним вибоєм. За умов крутого падіння виймання ціликів біля нахилених виробок припустиме лише методами, які виключають наявність людей в очисному вибої (гідровідбій, буровибуховий спосіб з застосуванням глибоких свердловин, застосування канатних пил).

В усіх випадках попередньо складають проект виймання ціликів, небезпечних за гірськими ударами, розглядаючи в проекті можливий перерозподіл напружень в області ціликів після їх виймання і передбачаючи разом з необхідною технологією гірських робіт проведення сейсмоакустичних спостережень і експериментальних вимірювань деформацій масиву попереду очисного вибою, деформацій і зміщень крівлі виробок.

### **Використання потенціальної енергії пружних деформацій масиву в процесі крихкого руйнування корисного компоненту при видобутку**

Запаси потенційної енергії, що накопичується у результаті пружної деформації привибійних частин масиву ударо- і викидо-небезпечних шарів і покладів, настільки великі, що часто приводять до бурхливого руйнування більш-менш значних частин масиву з інтенсивним крихким подрібненням.

У практиці гірських робіт давно замічено, що при високій напруженості входження видобувних інструментів у масив і відділення шматків корисної копалини від масиву часто значно полегшуються. Наприклад, швидкість буріння шпурів і свердловин у сильно напруженому масиві зростає іноді в 2...3 рази, причому зустрічаються ділянки, на яких буровий інструмент входить в масив при мізерно малих осьових зусиллях. У 1,5...2 рази і більше зростає в таких умовах продуктивність забійників, які ведуть видобуток із

застосуванням відбійних молотків. При виконанні прохідницьких чи очисних гірських робіт буровибуховим методом коефіцієнт використання шпурів в ударо- і викидонебезпечних умовах звичайно стає більшим одиниці. На деяких шахтах при проходці виробок систематично відбуваються так звані «самовідпали», які представляють собою мікроудари.

Теоретичний розгляд питання про запаси енергії в привибійних частинах масиву корисної копалини і експерименти на моделях показують, що із збільшенням ширини привибійної полоси корисного компоненту, що відбивається, кількість звільненої потенційної пружної енергії росте за законом, який приблизно може бути охарактеризованим рівнянням параболи третього ступеня. Загальний баланс енергії складається з пружної енергії, зосередженої в корисній копалині, і енергії, зосередженої в породах. Крім того, уступ, що утворився попереду виконавчого органу виймальної машини, створює додаткову концентрацію напружень в шарі корисного компоненту і породах, в результаті чого запаси потенціальної енергії в привибійній зоні підвищуються.

Оскільки кількість пружної енергії, яка переходить із потенціальної в кінетичну з збільшенням ширини полоси корисного компоненту, що виймається росте досить інтенсивно, змінюючи ширину захвату виймальної машини, можна активно і притому в значній мірі регулювати процес вивільнення енергії гірського тиску, забезпечуючи в конкретних гірничо-геологічних умовах вивільнення такої кількості потенціальної енергії за одиницю часу, яка необхідна і достатня для безпечного і ефективного руйнування корисного компоненту.

Варіюючи ширину захвату і швидкість впровадження виконавчого органу виймальної машини, можна, з однієї сторони, досягти виключення небезпечного прояву гірського тиску, а з іншої – використовувати вивільнену потенціальну пружну енергію для крихкого руйнування корисного компоненту та його виймання. При цьому швидкість входження в корисну копалину виконавчого органу виймальної машини дозволяє у відомих межах керувати процесом переходу пружної енергії в енергію роботи по пластичному деформуванню і руйнуванню привибійної частини корисної копалини. При достатньо високих швидкостях навантаження пружні напруження в шарі корисної копалини не встигають

вирівнюватись. Внаслідок цього виконавчий орган виймальної машини підсікає область масиву з більш високими напруженнями, чим тимчасовий опір стиснення елемента масиву в місці зарубки. Це призводить до процесу крихкого руйнування. Зниження швидкості входження дозволяє послабити процес крихкого руйнування чи взагалі виключити його. З іншої сторони, мінімальне руйнування корисної копалини ріжучим органом дозволяє максимально використовувати потенціальну енергію для крихкого руйнування частини копалини, що підрізається.

Ці принципи прийняті в якості основи створення спеціальних гірських машин. Одним із типів таких машин, які пройшли широкі промислові випробування і практичне застосування на ударонебезпечних вугільних пластах є канатні пили (рис. 1).

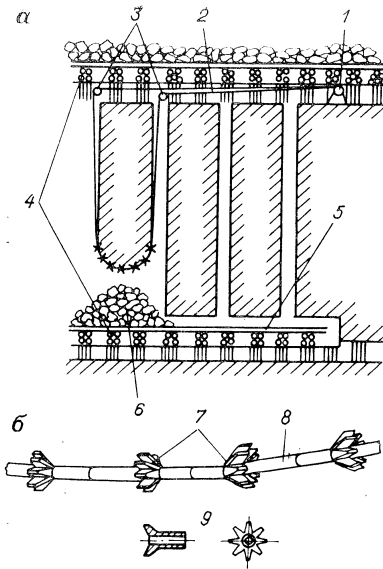


Рис. 1. Схема роботи канатної пили в очисній виробці (а) і конструкція ріжучого органу (б): 1 – привідна лебідка; 2 – канат; 3 – направляючі блоки; 4 – кустове кріплення; 5 – накатники; 6 – відбите вугілля; 7 – фрези; 8 – середня частина ріжучого органу; 9 – конструкція односторонньої фрези.

Використання канатних пил дозволило здійснювати безлюдний видобуток вугілля при мінімальних енергетичних витратах на руйнування.

Про енергетичну ефективність використання гірського тиску при видобутку можна судити на основі порівняння значень конструктивного показника подрібнення корисного компоненту:

$$K_n = \frac{V_1}{V} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $V_1$  – об'єм корисного компоненту, безпосередньо зруйнованого різцями виконавчого органу;  $V$  – загальний об'єм видобутого корисного компоненту.

Показник  $K_n$  для різних типів врубових машин для вугілля, не передбачаючих використання ефекту крихкого руйнування, складає 20...100%, при

використанні ж канатних пил лише 1...5%. Таке велике зниження енергоємності процесу руйнування дозволяє істотно спрощувати конструкції видобувних машин, забезпечуючи їм більш високу надійність.

Досвід показав, що прорізування канатними пилами тонких щілин (товщиною 3...10 см) з поглибленням на 15...20 см на пластах, схильних до крихкого руйнування і особливо небезпечних по гірських ударах, приводило до мікроударів, у результаті яких пласт руйнувався на всю його потужність, причому руйнування часто випереджало ріжучий орган.

Поряд зі способом виймання корисних копалин за допомогою канатних пилок перспективними способами, заснованими на використанні потенціальної пружної енергії привибійного масиву, можуть бути: дистанційне буріння свердловин великого діаметра (250...300 мм і більше); комбіноване застосування свердловин з різальними інструментами); гідророзмивання корисної копалини через свердловини малого діаметра, при якому поряд з подрібненням копалини відбувається його руйнування під дією реалізованої пружної енергії.

Дуже перспективний спосіб провокування раптових викидів заданої енергії, тобто регульованих викидів при проходці виробок по викидонебезпечним породам з використанням для такого регулювання щитів, що перекривають вироблення. Цей спосіб може бути успішно застосований і при веденні очисних робіт на могутніх шарах і покладах.

Значної уваги заслуговує пропозиція С.Г. Авершина та І.М. Петухова про кероване руйнування корисної копалини в привибійних напружених зонах шляхом прикладення додаткової необхідної енергії за допомогою вібраційних машин. Можливості широкого варіювання частотним спектром порушуваних пружних коливань і наближення їхніх частот до резонансних дозволяють максимально використовувати енергію на руйнування і роблять цю пропозицію дуже перспективною.



## ДОДАТКИ

### Додаток А. Знання та навички, які повинен отримати студент при вивченні курсу „Фізика гірських порід”

Вміти оцінити:

- геомеханічну ситуацію щодо виробки, яка розглядається: геологічних, гідрогеологічних, структурних і текстурних особливостей породного масиву;
- оцінити межу міцності гірських порід на одновісне стиснення, розтяг, зсув;
- розрахувати величину коефіцієнта структурного послаблення;
- розрахувати ймовірність підняття порід підшоши виробки: теорії вздуття порід підшоши; способи протистояння вздуттю порід підшоши;
- розрахувати параметри кріплення підземної виробки: теорії гірського тиску; системи кріплення; конструкції кріплення.

### Додаток Б. Теми рефератів

1. Пружні властивості гірських порід і оцінка впливу мінерального складу, шаруватості, пористості та зовнішніх полів на модуль пружності.
2. Розподілення пружних коливань і оцінка акустичних характеристик гірських порід.
3. Оцінка залежності поширення пружних коливань від внутрішніх і зовнішніх факторів та дія пружних коливань на гірські породи.
4. Теорії міцності твердих тіл. Вплив дефектів і мінерального складу на міцність порід.
5. Теорії міцності твердих тіл. Вплив будови гірських порід на їх міцність.
6. Теорії міцності твердих тіл. Вплив зовнішніх факторів на міцність гірських порід.
7. Оцінка зв'язку пружних і міцнісних характеристик порід у зразку та масиві.
8. Оцінка пластичних і реологічних властивостей гірських порід.
9. Оцінка напружень і деформацій у гірських породах.
10. Основні моделі механіки суцільних середовищ.
11. Основні моделі механіки суцільних середовищ. Реологічні моделі.

12. Напружено-деформований стан суцільного середовища. Напружений стан у точці.

13. Напружено-деформований стан гірського масиву. Розподілення напружень навколо підземних виробок.

14. Механічні процеси в масивах порід, які містять гірські виробки і аналітичні методи дослідження цих процесів.

15. Розрахункові схеми взаємодії масивів гірських порід з підземними спорудами та їх класифікація.

16. Формування навантаження на конструкції підземних споруд.

17. Вплив форми вибою на напружений стан привибійного простору гірничої виробки.

18. Огляд досліджень зміни напруженого стану масиву гірських порід навколо підготовчих виробок.

19. Зміцнення порід, як спосіб підвищення стійкості виробок.

20. Аналіз досліджень прояву гірського тиску у вертикальних стволах на великих глибинах.

21. Дослідження співвідношення між загальним коефіцієнтом міцності і контактною міцністю гірських порід.

22. Аналіз досліджень раціональної величини площі перерізу виймальних штреків.

23. Методи боротьби з вздуттям порід у гірських виробках.

24. Фізико-механічні властивості слабометоморфізованих гірських порід та коефіцієнт бокового розпирання.

25. Визначення фільтраційних властивостей гірських порід

### **Додаток В. Перелік питань для рубіжного контролю №1**

- 1) Описати будову Землі.
- 2) Що таке «масштабний ефект» і «масштабний фактор»?
- 3) Що таке «дрейф континентів»?
- 4) Розповісти про розвиток механіки гірських порід та її взаємозв'язок з іншими науками.
- 5) Основні моделі в механіці гірських порід.
- 6) Розкрити питання кругообігу гірських порід.
- 7) Тріщинуватість породних масивів.
- 8) Класифікація гірських порід за характером внутрішніх зв'язків та за М.М. Протодьяконовим.

- 9) Пружність, крихкість і пластичність гірських порід.
- 10) Що таке деформування і руйнування гірських порід за межею міцності?
- 11) Розкрити причини гороутворення.
- 12) Пружно-пластична стійкість породного масиву в межах одиночної виробки.
- 13) Генезис, склад і будова гірських порід.
- 14) Порооди (магматичні, метаморфічні, осадові), мінерали та коштовне каміння.
- 15) Основні поняття та визначення дисципліни «Механіка гірських порід».
- 16) Охарактеризувати реологічні властивості гірських порід. Реологія, повзучість деформацій, релаксація напружень.
- 17) Масштабний ефект в гірських породах, коефіцієнт структурного послаблення.
- 18) Що вивчає наука реологія? Повзучість деформацій, релаксація напружень.

### **Перелік питань для рубіжного контролю №2**

- 1) Що розуміють під елементарним об'ємом породного масиву.
- 2) Гіпотеза зводу природної рівноваги. Теорія М.М. Протодьяконова та П.М. Цимбаревича.
- 3) Початковий напружений стан сипучих породних масивів.
- 4) Поняття про теорію спадкової повзучості.
- 5) Основні види напруженого стану суцільно деформованого тіла (об'ємний, плоский напружений стан, плоска деформація).
- 6) Прояви гірського тиску в очисних виробках при різних системах розробки вугільних і рудних родовищ.
- 7) Статична обробка результатів вимірювань.
- 8) Гіпотеза взаємодії кріплення і породного масиву. Теорія А.Лабасса.
- 9) Теорія руйнування гірських порід у складному напруженому стані.
- 10) Гіпотеза зводуутворення в умовах взаємодії кріплення з породним контуром.
- 11) Граничні умови рівноваги суцільно деформованого тіла.
- 12) Визначення механічних властивостей гірських порід в натурних умовах.

13) Охарактеризувати напружено-деформований стан порід навколо очисної виробки. Зони опорного тиску і розвантаження породних масивів.

14) Напружений стан гірських порід.

15) Характерні особливості прояву гірського тиску та задачі управління ним в очисних виробках.

16) Початковий напружений стан зв'язних породних масивів.

17) Розвиток уявлень про міцність і руйнування твердих тіл.

18) Випробування гірських порід у складному напруженому стані. Паспорт міцності матеріалу.

### **Перелік питань для рубіжного контролю №3**

1) Емпіричні методи визначення навантаження на кріплення стволів.

2) Методи розрахунку навантаження на кріплення ствола, основані на гіпотезі спільного деформування системи «кріплення ствола-порода».

3) Раптові викиди вугілля.

4) Захист людей від гірських ударів і раптових викидів.

5) Загальні уявлення про стійкість ціликів та потолочин камер.

6) Фізичні і структурні особливості системи «вугілля-метан».

7) Форми прояву зрушення порід при відкритій розробці родовищ корисних копалин (оповзень, обвалення, осип, просідання, фільтраційні деформації).

8) Реологічні методи оцінки видавлювання порід ґрунту у виробках.

9) Гірські удари.

10) Розрахунок допустимої ширини міжкамерних ціликів.

11) Протизсувні заходи на кар'єрах.

12) Оцінка викидонебезпечності гірських порід і прогноз раптових викидів.

13) Вздуття порід ґрунту підземних виробок.

14) Дати класифікацію гірських ударів за фізичною, енергетичною та топологічною ознаками.

15) Метод розрахунку міжкамерних ціликів систем розробки методом свердловинного гідровидобутку.

16) Основні положення методів розрахунку стійких відкосів і бортів кар'єрів.

- 17) Тиск на кріплення зі сторони ґрунту виробки.
- 18) Теорії газодинамічних явищ.
- 19) Умови виникнення раптових викидів і уявлення про їх механізм.
- 20) Способи запобігання і методи прогнозу газодинамічних явищ.
- 21) Основні поняття про раптові викиди вугілля породи та газу в підземних виробках.
- 22) Методи розрахунку відкосів, оснований на гіпотезі плоскої поверхні зсування.
- 23) Емпіричні методи прогнозу вздуття порід ґрунту.
- 24) Використання потенціальної енергії пружних деформацій масиву в процесі крихкого руйнування корисного компоненту при видобутку.
- 25) Методи розподілення навантаження на кріплення ствола, оснований на теорії розрахунків породних стін.
- 26) Виймання ціликів небезпечних по гірським ударам.
- 27) Методи розрахунку відкосів, засновані на гіпотезі криволінійної поверхні здвигання.
- 28) Раптові викиди вугілля.
- 29) Прогноз і реєстрація гірських ударів.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Базові

1. Судаков А. К., Коровяка Є. А., Максимович О. В., Расцветаев В. О., Дзюбик А. Р., Яворська В. В., Войтович А. А. Основи нафтогазової справи: підручник. – Дрогобич: «Посвіт», 2023. 599 с.
2. Купер І.М. Фізика нафтового і газового пласта: підручник / І.М. Купер, А.В. Угриновський. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. – 448 с.
3. Буріння свердловин: навч. посіб. / Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.О. Расцветаев ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». - Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 292 с.

### Інформаційні

<https://do.nmu.org.ua/course/view.php?id=2603>

### ресурси