

## 2. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

**Навчальні цілі:** у результаті вивчення цього розділу студент повинен знати основні фізико-механічні властивості гірських порід; класифікації порід за цими властивостями; методику їх визначення; види руйнування гірських порід при бурінні; уміти визначити фізико-механічні властивості порід та використати набуті знання для вибору способу, режиму та інструменту для буріння свердловин.

Властивості гірських порід залежать від походження (магматичні, осадові, метаморфічні) і від геологічних процесів, що відбуваються після їхнього утворення.

Фізико-механічні властивості гірських порід поєднують фізичні та механічні властивості, що впливають на процес їхнього руйнування.

Фізичні властивості гірських порід характеризують їхній фізичний стан. Сюди належать: ступінь зв'язності, пористість, щільність, питома вага, структура, текстура, зернистість.

Механічні властивості гірських порід є різновидом фізичних властивостей і проявляються лише під дією механічних сил. Вони виражаються у здатності гірських порід чинити опір деформуванню і руйнуванню. Сюди відносять: міцність, динамічну міцність, твердість, пружність, крихкість, пластичність, абразивність тощо.

Вивчення фізико-механічних властивостей гірських порід необхідно для:

- вибору способу буріння і типу породоруйнівного інструменту;
- розробки раціональної технології буріння та кріплення стінок свердловини;
- розширення геологічної вивченості району робіт тощо.

Особлива увага приділяється вивченню фізико-механічних властивостей керна з опорних свердловин, тому що результати цих досліджень використовуються при складанні проекту буріння свердловин у цьому районі.

Основні фізико-механічні властивості порід визначаються комплексом геологічних ознак: мінералогічним складом, структурою, текстурою і залежать від властивостей основної мінеральної речовини, величини зерен, складу і властивостей мінерального цементу, пористості, тріщинуватості тощо.

Основні властивості, що впливають на процес буріння: міцність, твердість, пружність, пластичність, крихкість, абразивність, стійкість, пористість, тріщинуватість, щільність, водно-колоїдні властивості.

### 2.1. Міцність гірських порід

**Міцністю** називається здатність порід чинити опір руйнуванню при стиску, сколюванні, розтяганні й інших видах деформації. Міцність порід залежить від багатьох факторів і коливається в широких межах.

Випробування міцності порід на стиск проводиться на гідропресах з визначенням стискального зусилля в момент руйнування зразків породи, які виготовлені у вигляді куба з ребром 50 мм або циліндрів з таким самим діаметром і висотою. Непаралельність площин зразка не повинна перевищувати 0,01–0,03 мм.

**Міцність на стиск** визначається за формулою

$$\sigma_{ст} = \frac{P}{S}, \quad (2.1)$$

де  $P$  – зусилля руйнування, Н;  $S$  – площа поперечного перерізу зразка, м<sup>2</sup>.  
Для різних порід межа міцності на стиск змінюється від 0,1 до 500 МПа.

**Коефіцієнт міцності** визначається за формулою

$$f = \frac{[\sigma_{ст}]}{10^7}. \quad (2.2)$$

Класифікація гірських порід за коефіцієнтом міцності розроблена М.М. Протодьяконовим і широко застосовується в геологорозвідувальній справі та гірництві.

Таблиця 2.1

Класифікація гірських порід за коефіцієнтом міцності

Категорія	Ступінь міцності	Найменування порід	Коефіцієнт міцності
I	Надзвичайно міцні породи	Найбільш міцні, щільні і в'язкі кварцити і базальти. Виняткові за міцністю інші породи	20 і більше
II	Дуже міцні породи	Дуже міцні гранітні породи. Кварцовий порфір, дуже міцний граніт, крем'янистий сланець, менш міцні, ніж зазначені вище, кварцити. Найміцніші пісковики і вапняки	15
III	Міцні породи	Граніт (щільний) і гранітні породи. Дуже міцні пісковики і вапняки. Кварцові рудні жили. Міцний конгломерат. Дуже міцний залізняк	10
IIIa	Те ж саме	Вапняки (міцні). Неміцний граніт. Міцні пісковики. Міцний мрамур, доломіт, колчедани	8
IV	Досить міцні породи	Звичайний пісковик. Залізняк	6
IVa	Те ж саме	Піскуваті сланці. Сланцюваті пісковики	5
V	Середні породи	Міцний глинистий сланець. Неміцний пісковик і вапняк, м'який конгломерат	4
Va	Те ж саме	Різноманітні сланці (неміцні). Щільний мергель	3
VI	Досить м'які породи	М'який сланець, м'який вапняк, крейда, кам'яна сіль, гіпс. Мерзлий ґрунт, антрацит. Звичайний мергель. Зруйнований пісковик, зцементована галька і кам'янистий ґрунт	2
VIa	Те ж саме	Щебенистий ґрунт. Зруйнований сланець, галька, що злежалася, і щебінь, міцне кам'яне вугілля, отверділа глина	1,5
VII	М'які породи	Глина (щільна). Середнє кам'яне вугілля. Міцний нанос – глинистий ґрунт	1,0
VIIa	Те ж саме	Легка піскувата глина, лес, гравій. М'яке вугілля	0,8
VIII	Землисті породи	Рослинна земля. Торф. Легкий суглинок, сирий пісок	0,6
IX	Сипучі породи	Пісок, осипи, дрібний гравій, насипна земля, добите вугілля	0,5
X	Пливучі породи	Пливуни, болотистий ґрунт, розріджений лес та інші розріджені ґрунти	0,3 і менше

Для визначення міцності порід на сколювання пластинку з гірської породи поперечним перерізом 30×15 мм і довжиною 120–150 мм поміщають у прилад між ножами, на один з яких діє гідравлічний прес. Межу міцності на сколювання знаходять за формулою аналогічно стиску.

Тимчасовий опір породи розтягання визначають на гідропресі, що має спеціальне пристосування. У зразку породи у формі прямокутної призми довжиною 80, шириною 20 і товщиною 10 мм з двох боків роблять виїмки, щоб поперечний переріз середньої частини зразка в передбачуваному місці розриву складав 10×10 мм.

Міцність порід на сколювання і розрив значно менше, ніж на стиск.

Межа міцності породи на сколювання дорівнює 0,2–0,08; на розтягання – 0,07–0,04 від межі міцності на стиск. Наприклад, сієніт Гороблагодатського родовища має такі властивості:  $\sigma_{ст} = 215$  МПа,  $\sigma_{ск} = 22$  МПа,  $\sigma_{розт} = 14,3$  МПа.

Очевидно, що гірські породи легше руйнувати сколюванням, ніж зминанням або роздавлуванням.

Міцність породи на стиск і сколювання у вибої свердловини значно вище, ніж у зразка. Тому при бурінні важливо, щоб на вибої утворювалися додаткові площини оголення у вигляді уступів і борозен.

Опір порід руйнуванню при динамічних навантаженнях істотно відрізняється від опору при статичному впливі. Це потрібно мати на увазі, використовуючи способи буріння, у яких переважає динамічний вплив на породу.

**Динамічну міцність** порід визначають за допомогою приладу визначення міцності (ПВК) методом товчіння, розробленим М.М. Протодьяконовим (молодшим). Випробований зразок гірської породи розбивають на шматки розміром 15–20 мм у поперечнику. Зі шматків набирають п'ять проб об'ємом по 15–20 см<sup>3</sup>. Кожну пробу товчуть у спеціальній ступці шляхом скидання на неї гирі масою 2,4 кг з висоти 600 мм 10 разів. Усі п'ять проб просівають через сито з отворами 0,5 мм. Частинки породи, що пройшли крізь отвори сита, зсипають у вимірвальний стакан діаметром 23 мм і ущільнюють постукуванням. Потім у стакан вставляють поршень з шкалою і вимірюють висоту стовпчика зруйнованої породи. Показник динамічної міцності визначається за формулою

$$F_d = \frac{20n}{l}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – кількість ударів гирею по шматкам породи у ступі ( $n = 10$ );

$l$  – висота стовпчика роздробленої породи.

За показником динамічної міцності породи поділяють на 6 груп.

Дослідження установили, що до порід однієї групи за динамічною міцністю можуть відноситися породи з різною міцністю на статичний стиск.

#### Класифікація порід за динамічною міцністю

Показники	Номер групи порід					
	I	II	III	IV	V	VI
Динамічна міцність $F_d$	8 і менше	8–16	16–24	24–32	32–40	40 і більше
Ступінь динамічної міцності порід	Малої міцності	Помірної міцності	Середньої міцності	Міцні	Дуже міцні	Вельми міцні

## 2.2. Твердість гірських порід

**Твердість** – опір породи вдавлюванню в неї іншого більш твердого тіла (індентора), пружною деформацією якого можна знехтувати.

Буріння супроводжується заглибленням у породу робочих елементів породоруйнівного інструменту (твердосплавних різців, алмазних зерен). Тому показник твердості безпосередньо впливає на швидкість буріння і характеризує породу краще ніж міцність.

Існує багато методів оцінки твердості гірських порід, заснованих на вдавлюванні в породу наконечників, дряпанні, стиранні і різанні породи.

За розповсюдженим методом Л.А. Шрейнера, твердість порід визначають шляхом вдавлювання у відшліфовану поверхню зразка породи штампа з гладким торцем площею 1 мм<sup>2</sup> (для твердих порід) і 5 мм<sup>2</sup> (для порід малої твердості). Виміри здійснюються на приладах УМГП-3 і УМГП-4. Прилади дозволяють автоматично записувати графік деформації породи. Графік слугує для визначення твердості, пружності, пластичності і крихкості порід.

**Пружність** – властивість порід змінювати свою форму й об'єм під дією зовнішнього навантаження і відновлювати первісний стан після усунення впливу.

**Пластичність** – властивість порід необоротно деформуватися під дією зовнішніх сил або внутрішніх напружень, тобто зазнавати пластичну (залишкову) деформацію без порушень суцільності матеріалу.

**Крихкість** – властивість порід руйнуватися без помітної пластичної деформації.

На рис. 2.1 наведені діаграми руйнування гірських порід, отримані на приладі УМГП-3.

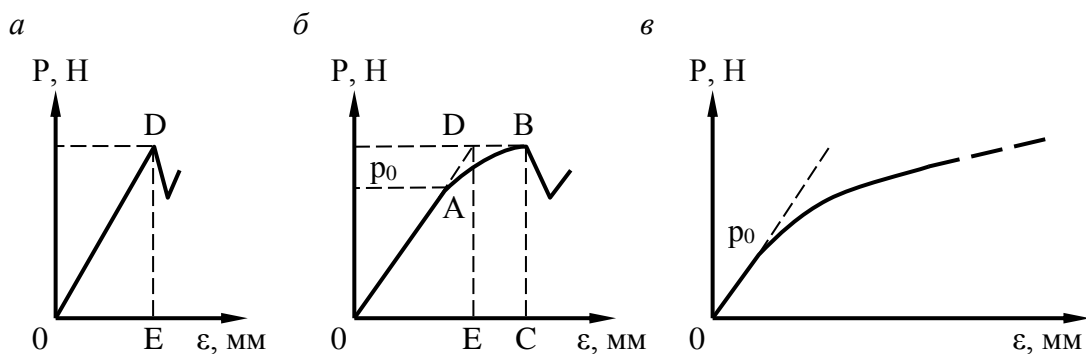


Рис. 2.1. Діаграми руйнування гірських порід (за Л.А. Шрейнером):  
а – крихких; б – пластичнокрихких; в – високопластичних;  
Р – зусилля на штамп;  
ε – деформація зразка

Твердість гірської породи за штампом визначається з виразу

$$P_{\text{шт}} = \frac{P_p}{S_{\text{шт}}}, \quad (2.4)$$

де  $P_p$  – навантаження, що відповідає межі міцності на вдавнення (визначаються відповідно до максимальної ординати діаграми деформації в момент руйнування);

$S_{\text{шт}}$  – площа штампа.

Діаграма, показана на рис. 2.1, *а*, отримана при випробуваннях крихких порід (наприклад, граніту, кварциту). Ділянка OD характеризує пружну деформацію породи.

На іншій діаграмі (рис. 2.1, *б*) ділянка OA відповідає пружній деформації, АВ – пластичній. У точці В настає крихке руйнування.

Умовна межа текучості гірської породи

$$p_0 = \frac{P_T}{S_{шт}}, \quad (2.5)$$

де  $P_T$  – навантаження, що відповідає межі текучості.

Така діаграма характерна, наприклад, для вапняків.

Твердість крихких порід, визначена даним методом, коливається в межах 1000–7600 МПа.

Пластичні породи типу кам'яної солі або глини не дають крихкого руйнування (рис. 2.1, *в*). Ступенем твердості в цьому випадку умовно вважають межу текучості  $p_0$ .

Твердість м'яких порід вимірюється також методом ВІЕМС. У породу вдавлюють циліндричний штамп з різним діаметром основи приладом ДМШ-1 на глибину 10 мм. При цьому динамометром визначається навантаження. Твердість для порід типу пісків, глин складає 1–12,5 МПа.

Всеросійський інститут техніки розвідки (ВІТР) розробив прилад ВІТР-ОТ (визначник твердості). Зразок породи ріжуть абразивним алмазним диском при певному тиску і часі впливу. Установлено, що глибина різання обернено пропорційна твердості породи за штампом. Для різних порід глибина різання міняється від 1 до 5,3 мм (тверді породи, навантаження на диск 41 Н) і від 0,76 до 2,28 мм і більше (породи середньої твердості, навантаження на диск 10 Н).

### 2.3. Абразивність гірських порід

**Абразивність** – здатність гірської породи зношувати при терті інструмент, що її руйнує (різці бурових коронок і доліт).

Абразивність є однією з найважливіших властивостей порід, що визначають вибір породоруйнівного інструменту і режим буріння.

При бурінні абразивних порід скорочується час роботи інструменту на вибої.

Абразивність гірських порід значною мірою залежить від твердості породотвірних мінералів. Підвищену абразивність мають породи, що складаються із зерен дуже твердих мінералів, пов'язаних менш твердим цементом. Для оцінки абразивності запропоновано багато способів, за основу в них прийнято один принцип – стирання еталонного предмета.

Широко відомий спосіб Л.І. Барона й А.В. Кузнецова, що полягає у визначенні втрати маси стрижня зі сталі-сріблянки при терті об гірську породу.

Застосовується стрижень діаметром 8 мм, що з одного кінця має отвір діаметром 4 і глибиною 10–12 мм. Перед проведенням випробувань стрижень зважують з точністю 0,1 мг. На спеціально обладнаному свердлильному верстаті закріплюють випробуваний зразок породи, притискають до нього й оберта-

ють стрижень зі швидкістю 400 об/хв при осьовому навантаженні 150 Н упродовж 10 хв. Потім стрижень перевертають і операцію повторюють. Після випробування стрижень знову зважують і визначають утрату маси. Показник абразивності визначають за формулою

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{2a}, \quad (2.6)$$

де  $a$  – показник абразивності гірської породи,  $q_i$  – утрата в масі стрижня за кожен парний дослід, мг;  $n$  – кількість парних дослідів.

Показник абразивності змінюється від 5 мг для малоабразивних порід (вапняки, мармур, апатит, сіль, глинисті сланці тощо) до 90 і більше для корундовмісних. Авторами методу розроблена класифікація порід за ступенем абразивності з восьми класів.

У геологорозвідувальних організаціях більш поширене визначення абразивності за методом Центрального науково-дослідного геологорозвідувального інституту ЦНДГРІ (Н.І. Любимов та ін.). Метод заснований на визначенні ступеня зносу свинцевих кульок (дробу) абразивним порошком досліджуваної породи. Для аналізу використовується фракція 0,5 мм і менше роздробленої породи, одержувана при визначенні її динамічної міцності описаним вище методом товчіння. Це дає можливість в одному зразку визначити два параметри – динамічну міцність і абразивність.

Може бути використаний і буровий шлам. Шлам породи об'ємом 1 см<sup>3</sup> розміщується в пробірку разом з 8 свинцевими дробинками нульового номера (4,2–4,3 мм), попередньо зваженими. Пробірка протягом 20 хв струшується на приладі кривошипно-шатунного типу. Після досліду дробинки зважують і визначають *коефіцієнт абразивності*

$$K_{\text{абр}} = \frac{Q}{100}, \quad (2.7)$$

де  $Q$  – утрата маси дробу, мг.

Виділено шість груп абразивності порід за показником  $K_{\text{абр}}$  від 0,5 до 3,0 (табл. 2.2).

Дослідження ЦНДГРІ показали, що абразивність порід у роздробленому стані тісно пов'язана з твердістю порід, визначеною методами різання (на приладі ОТ) або стирання. Зв'язок між абразивністю і динамічною міцністю порід не спостерігається.

## 2.4. Тріщинуватість гірських порід

Тріщинуватість гірських порід також є властивістю, що обов'язково враховується при виборі породоруйнівного інструменту і режиму буріння.

У ВІТРі розроблена класифікація порід за ступенем тріщинуватості (табл. 2.3). У таблиці *питома кускуватість* – це кількість кусків породи, на які розділяється тріщинами один метр керна. Показник тріщинуватості – це кількість тріщин на вибої свердловини (у торці керна), що перетинають різець коронки за один оберт бурового снаряда. У тріщинуватих породах при перети-

нанні різцем тріщин виникають удари, що призводять до поломки різців. Тому доводиться знижувати параметри режиму буріння.

Таблиця 2.2

Класифікація гірських порід за ступенем абразивності

Но- мер групи	Ступінь абразивно- сті	Найменування порід	Показник абразив- ності
1	Малоабра- зивні	Мармур, вапняки, ангідрит, алевроліт, доломіти, крейда, алевроліти вапняні, сланці піщано-глинисті, апатити	0,5 і менше
2	Помірно- абразивні	Руда марганцева, туфобрекчії, доломіт, хлорито-кременисто-магнетитова порода, скарн переважно карбонатно-піроксенового складу, сланець серицито-хлорито-карбонатний польовошпатовий, вапняк частково окременілий, сланці хлорито-кварцові, скарни піроксен-карбонатні, сланці піщані, порфірити діабазові	0,5–1
3	Середньо- абразивні	Карбонато-хлорито-епідотові породи, скарн карбонатний окременілий, діабаз, туфопісковики, скарн епідото-хлорито-піроксеновий туф кварцових порфірів, туф кисло-ефузиву, піроксенальбітова порода, адамеліт-порфір, діорит скарновий, алевроліти окременілі, габро, каратофіри, вапняки окременілі, пісковики аркозові, туф кварцових порфірів	1–1,5
4	Абразивні	Діорит епідотовий із сульфідами, скарн рудний, сієніти, туф ороговілий, гранодіорити, діабазовий порфірит, габро-діабаз, діорит кварцовий, альбітофір ороговілий, кварцові порфіри, роговики піроксенові, скарн гранатопіроксеновий, пісковик ороговілий, руда гематитова, кварцити залізисті, гравеліти, пісковики кварцові	1,5–2
5	Досить аб- разивні	Кварц жильний, граніти середньозернисті, граносієніт-порфір, пісковик кварцовий кременистий, кварцити, кварц-турмалінова порода, адамеліт, роговик силікатно-магнетитовий, скарн гранатовий, гнейси, сієніто-діорити	2–2,5
6	Дуже абра- зивні	Яшмоподібна порода, кварцити, граніти дрібнозернисті, сієніти окременілі, роговики мартитогематитові, джеспіліти, піроксеніти окварцьовані, корундовмісні породи	2,5–3 і більше

Таблиця 2.3

Класифікація гірських порід за ступенем тріщинуватості

Група	Ступінь тріщинуватості	Питома кускува- тість керна, шт/м	Показник тріщи- нуватості, 1/об	Вихід керна, %
1	Монолітні	1–5	До 0,50	100–70
2	Слаботріщинуваті	6–10	0,51–1,00	90–60
3	Тріщинуваті	11–30	1,01–2,00	80–50
4	Сильнотріщинуваті	31–50	2,01–3,00	70–40
5	Надто і виключно сильнотріщинуваті	51 і більше	3,01 і більше	60–30 і менше

ВІТР рекомендує також використовувати ще одну характеристику ступеня тріщинуватості порід – відношення середньої довжини куска керна до діаметра керна. Для 1–2 груп ця величина більше 2,5; для 3 – 0,6–2,5; для 4–5 – менше 0,6.

Якщо сильнотріщинуватою породою є корисна копалина, то для одержання якісних проб при бурінні доводиться застосовувати спеціальні колонкові снаряди.

Від тріщинуватості порід залежить і поглинання промивальної рідини. Тут важливою є величина розкриття тріщин. При розкритті тріщин до 3 мм виникають часткові поглинання, більше 3 – повні, більше 10 – катастрофічні.

## 2.5. Буримість гірських порід

Розглянуті властивості, у першу чергу, міцність, твердість і абразивність, впливають на буримість гірських порід.

**Буримість** — це величина поглиблення вибою свердловини за одиницю часу, протягом якого до породоруйнівного інструменту прикладені зовнішні навантаження. Буримість адекватна механічній швидкості буріння.

Буримість залежить від застосовуваного способу руйнування і властивостей розбурюваних порід; зносостійкості породоруйнівного інструменту; техніки і технології бурових робіт; їхньої організації; а також від кваліфікації обслуговуючого персоналу. Навіть при бурінні тих самих порід буримість змінюється в часі, що пов'язано з абразивним зносом породоруйнівного інструменту. Чим твердіші і міцніші породи, тим менша їх буримість. У свою чергу, ці властивості порід залежать від їхнього мінерального складу, пористості, структури, текстури тощо.

Залежно від застосовуваного способу буріння розроблені різні класифікації гірських порід за буримістю. Їхньою основою є незмінність фізико-механічних властивостей гірських порід і змінюваність шкали буримості (швидкості буріння) у міру вдосконалювання техніки і технології проходки свердловин. Відповідно до цього принципу гірські породи, що мають однакову буримість, поєднуються в одну групу (категорію). Кількість категорій залежить від способу проходки свердловини. Наприклад, при ударно-канатному способі буріння всі гірські породи розділені на сім категорій (табл. 2.4); при обертальному – на дванадцять; при розвідці розсіпів – на шість тощо.

Найбільш відома і застосовувана на практиці класифікація для обертального буріння за Єдиними нормами виробітку 1984 р. (ЄНВ) наведена в табл. 2.5 із зазначенням середньої механічної швидкості буріння.

При користуванні цією класифікацією можливо необ'єктивне визначення категорій за буримістю (завищення або заниження її), тому що вона встановлюється геологами шляхом візуального обстеження керна з урахуванням фактичної швидкості буріння. Це не сприяє технічному прогресу в бурінні, тому що веде до заниження категорії добре працюючим буровим бригадам і завищення – погано працюючим.

Для об'єктивної оцінки розроблений метод контрольного визначення порід за буримістю для обертального буріння (ГСТ 41-89–74), в основу якого покладені об'єктивні відомості про фізико-механічні властивості розбурюваних порід.



Класифікація гірських порід за буримістю для  
ударно-канатного буріння (крім розробки розсипних родовищ)

Категорія порід за буримістю	Типові для кожної категорії гірські породи
I	Торф, рослинний шар, пухкі піщано-глинисті ґрунти без гальки і щебеню, трепел
II	Торф і рослинний шар з коренями дерев, пухкі піщано-глинисті ґрунти з домішкою (до 20 %) дрібною галькою і гравієм, стрічкові піскуваті глини, діатоміт, слабка крейда
III	Піщано-глинисті ґрунти з домішкою (понад 20 %) гравію і дрібною галькою. Пухкі мергелі, щільні глини і суглинки. Сухі піски, лід
IV	Піщано-глинисті ґрунти з великим (понад 30 %) вмістом гравію і гальки. Щільні в'язкі глини. Вуглисті сланці, мергель, гіпс, тверда крейда, боксити, фосфорит, опока, галіт
V	Вапняки, доломіти, мармур, аргіліти, вивітрілі граніти, сієніти, діорити, конгломерати осадових порід, мерзлі ґрунти, галечники, габро
VI	Великий галечник з невеликою кількістю дрібних валунів. Окварцьовані сланці, вапняки і пісковики. Грубозернисті граніти, сієніти, гнейси, габро, пегматити. Конгломерати осадових порід на кременистому цементі
VII	Галечник з великою кількістю великих валунів. Валуні кристалічних порід. Дрібнозернисті граніти, сієніти, діорити, габро. Сильно окварцьовані пегматити. Конгломерати

Категорія породи за буримістю встановлюється на приладі ПОАП-2М виміром коефіцієнтів динамічної міцності  $F_d$  і абразивності  $K_{абр}$ . Визначається **об'єднаний показник**

$$\rho_m = 3F_d^{0,8} K_{абр} \quad (2.8)$$

Значення  $\rho_m$  устанавлюють як середню величину за результатами двох випробувань зразків породи. Категорія порід за буримістю визначається порівнянням  $\rho_m$ , отриманого за формулою (2.8), зі стандартним, величина якого наведена в табл. 2.4.

При наявності колекції еталонних зразків, що відбираються з кожного різновиду порід, об'єднаний показник  $\rho_m$  визначають лише в порядку контролю й об'єктивного встановлення категорії породи при вирішенні спірних питань.

Нормування гірських порід проводиться за Єдиною класифікацією гірських порід за буримістю. Відповідно до неї всі гірські породи розділені на 20 категорій залежно від тривалості часу чистого буріння 1 м шпура (табл. 2.5). При визначенні категорії породи за буримістю фіксується найменша і найбільша тривалість буріння, після чого розраховується середнє значення, за яким і встановлюється категорія породи.

Класифікація гірських порід за буримістю  
для обертального механічного буріння

Категорія порід за буримістю	Типові для кожної категорії гірські породи	Об'єднаний показник $\rho_m$	Швидкість буріння $V_m$ , м/год	Твердість порід за штампом $\rho_{шт}$ , МПа	Коефіцієнт міцності за Прото-дьяконовим
I	Торф, лес, слабка крейда і супіски без глини і щебеню	–	23–30	100	0,3–1
II	Рослинний шар, щільний пісок, глина середньої твердості, щільний суглинок, мергель, безнапірний пливун	–	11–15	100–250	1–2
III	Слабозцементовані пісковики, щільна глина, щільний мергель, піщано-глинисті ґрунти зі вмістом (понад 20 %) гальки, напірний пливун	2–3	5,7–10	250–500	2–4
IV	Глинисті сланці, слабкі пісковики, нещільні вапняки і доломіти	3–4,5	3,5–5	500–1000	4–6
V	Галечно-щебенисті ґрунти, аргіліти, хлоритові сланці, вапняки, мрамур, мергелисті доломіти	4,5–6,8	2,5–3,5	1000–1500	6–7
VI	Глинисті кварцово-хлоритові сланці, польовошпатові пісковики, конгломерати осадових порід на вапняковому цементі, апатити	6,8–10	1,5–2,5	1500–2000	7–8
VII	Роговообманкові сланці, окварцьовані вапняки, конгломерати з галькою (до 50 %) вивержених порід, грубозернистий діорит	10–15	1,9–2	2000–3000	8–10
VIII	Кварцові пісковики, окременілі сланці, гранатові скарни	15–21	1,3–1,9	3000–4000	11–14
IX	Сієніти, грубозернисті граніти, конгломерати вивержених порід, сильно окременілі вапняки	23–24	0,75–1,2	4000–5000	14–16
X	Граніти, гранодіорити, окременілі скарни, жильний кварц, валунно-галькові відклади вивержених порід	34–51	0,5–0,75	5000–6000	16–18
XI	Кварцити, джеспіліти, залізисті роговики	51–77	0,3–0,5	6000–7000	18–20
XII	Зливні кварцити, роговики, корундові породи	77–120	0,15–0,25	>7000	20–25 і більше

Таблиця 2.6

Класифікація гірських порід за буримістю відповідно до Єдиної класифікації

Категорія порід за буримістю відповідно до Єдиної класифікації	Коефіцієнт міцності за Протодьяковим	Середня тривалість буріння 1 м шпура, хв	Категорія порід за буримістю відповідно до Єдиної класифікації	Коефіцієнт міцності за Протодьяковим	Середня тривалість буріння 1 м шпура, хв
I	0,3–1	–	XI	6–8	3,75
II	0,3–1	–	XII	6–8	4,65
III	0,3–1	–	XIII	8–10	5,75
IV	1–2	–	XIV	8–10	6,95
V	1–2	–	XV	15	8,4
VI	4	1,14	XVI	16	10,0
VII	4–5	1,5	XVII	16	12,0
VIII	4–5	1,9	XVIII	18	14,3
IX	4–5	2,45	XIX	20	17,0
X	4–5	3,0	XX	20	21,0

Класифікації порід за буримістю необхідні як критерії при плануванні, фінансуванні і проектуванні бурових робіт, при нормуванні праці працівників геологорозвідувальних організацій.

## 2.6. Інші фізико-механічні властивості гірських порід

Крім описаних вище фізико-механічних властивостей порід, на процес буріння впливають й інші властивості.

**Стійкість** – здатність гірських порід не обрушуватися при оголенні їх в масиві буровими свердловинами або гірничими виробками. У нестійких породах потрібно закріплювати свердловину або виробки і, крім того, уживати заходів до збереження керна, що руйнується. Стійкість гірських порід залежить від характеру зв'язків між частинками, які їх складають, міцнісних показників порід, тріщинуватості, вивітрілості та у деяких випадках – від багатоводності. У зв'язку з цим класифікації стійкості носять дещо умовний характер. Так, при бурінні свердловин усі гірські породи розділяють на чотири групи.

I – породи надто нестійкі. До них належать пухкі незв'язні породи (піски, гравій, галечник), особливо насичені водою, і такі, що практично не мають зв'язку між частинками. Такі породи бурять з одночасним або навіть випереджаючим кріпленням обсадними трубами чи з промиванням спеціальними промивальними рідинами.

II – породи зі змінюваною стійкістю. Це породи зі складним зв'язком, який зникає при насиченні водою або нагріванні, такі, що розмиваються або розчиняються промивальною рідиною (глини, суглинки, леси, солі, а також мерзлі пухкі породи). Буріння в таких породах призводить до звуження, опливання, розмивання стінок свердловини, утворення сальників, каверн, у результаті чого виникають затягування, прихвати й обриви бурового снаряда. Нестійкість таких порід з часом збільшується. Ці породи бурять спеціальними методами і способами.

III – породи слабостійкі. До цієї групи належать породи тріщинуваті або роздрібнені, крихкі, такі, що легко стираються і розмиваються промивальною рідиною (брекчії, конгломерати, слабкі пісковики, сланці, вугілля). При бурінні таких порід відбувається поглинання промивальної рідини, вивали окремих кусків породи, утворення жолобів тощо.

IV – породи стійкі. Сюди відносять магматичні, метаморфічні, міцні осадові породи, монолітні або слаботріщинуваті, які не зачеплені вивітрюванням. Умови буріння в таких породах найбільш сприятливі.

У гірництві частіше використовують дещо іншу класифікацію, яка передбачає розподіл гірських порід на п'ять груп.

I – дуже нестійкі – не допускають навіть незначного оголення і потребують негайного чи випереджаючого зведення кріплення.

II – нестійкі – допускають на короткий час невелике оголення і потребують міцного кріплення.

III – середньої стійкості – допускають на нетривалий час оголення на значній площі й потребують підтримки після оголення.

IV – стійкі – допускають оголення значних площ на порівняно тривалий час і потребують лише часткової підтримки.

V – дуже стійкі – допускають оголення великих площ на тривалий час і не потребують підтримки.

**Пористість** – характеризується наявністю в породі пустот і ускладнює процес буріння. Пори можуть утворитися за рахунок розтріскування породи.

**Водно-колоїдні властивості** порід (вологість, вологоємність, водопроникність, набрякання, розмокання, розчинність, пливучість) визначають стійкість стінок свердловини і характер взаємодії порід із промивальною рідиною. Зокрема, **водопроникність** – властивість породи пропускати крізь себе воду. При бурінні свердловин водопроникність характеризують коефіцієнтом фільтрації  $K_f$ , який визначається за формулою

$$K_f = \frac{Q\Delta L}{S\Delta p} \mu_v, \quad (2.9)$$

де  $Q/S=V_f$  – швидкість фільтрації (швидкість руху води з витратою  $Q$  через переріз  $S$ ), м/с;  $\Delta p$  – перепад тиску на шляху фільтрації води  $\Delta L$ , Па;  $\mu_v$  – в'язкість води, Па·с.

Залежно від величини  $K_f$  гірські породи поділяють на: водотривкі ( $K_f < 0,1$  м/добу), слабопроникні ( $K_f = 0,1-10$  м/добу), середньопроникні ( $K_f = 10-500$  м/добу), легкопроникні ( $K_f > 500$  м/добу). Водопроникність – одна з основних характеристик, від якої залежить ступінь поглинання промивальної рідини при бурінні. При спорудженні водозабірної свердловини від коефіцієнта фільтрації порід водоносного горизонту залежить вибір методу його розкриття і конструкції водоприймальної частини.

У пухких породах вода фільтрується в гірничу виробку, у більш щільних – попадає в неї крізь відкриті, з'єднані між собою пори і тріщини. Кількість води, що надходить у виробку, також характеризує породи. За цією ознакою породи поділяють на такі групи:

1. Сильноводоводні – дебіт свердловин  $> 10$  л/с.
2. Водоводні – від 1 до 10 л/с.
3. Слабоводоводні – від 0,1 до 1 л/с.
4. Водоносні – від 0,01 до 0,1 л/с.
5. Водотривкі – практично сухі.
6. Водонепроникні – безводні.

**Щільність** – відношення абсолютно сухої маси породи до загального об'єму твердої частини породи.

Від величини щільності залежать умови транспортування зруйнованої породи на поверхню.

**Вибуховість** – здатність порід руйнуватися під дією зовнішніх зусиль при вибуху зарядів вибухових речовин (ВР). Вона характеризується питомою витратою ВР, тобто кількістю ВР, яка необхідна для відбою  $1 \text{ м}^3$  породи від масиву, або кількістю метрів шпурів, в яких може бути розташована необхідна для відбою і подрібнення  $1 \text{ м}^3$  породи кількість ВР.

**Розпушуваність** – властивість гірських порід у розпушеному стані займати більший об'єм ніж у масиві. Ця властивість характеризується **коефіцієнтом розпушуваності**, який показує, у скільки разів об'єм підірваної породи більший ніж початковий її об'єм у масиві. Розпушуваність породи залежить від її міцності, в'язкості, тріщинуватості та інших факторів. Практикою гірничорудних і геологорозвідувальних підприємств встановлено, що, чим більша міцність гірських порід, тим вищий коефіцієнт розпушуваності  $R_0$  (табл. 2.7).

Таблиця 2.7

Значення коефіцієнта розпушуваності

Категорія порід за буримістю відносно до Єдиної класифікації	Коефіцієнт розпушуваності $R_0$	Категорія порід за буримістю відносно до Єдиної класифікації	Коефіцієнт розпушуваності $R_0$
I	1,20	XI	1,55
II	1,30	XII	1,55
III	1,35	XIII	1,60
IV	1,40	XIV	1,60
V	1,45	XV	1,60
VI	1,45	XVI	1,70
VII	1,45	XVII	1,80
VIII	1,50	XVIII	1,90
IX	1,50	XIX	1,90
X	1,50	XX	2,00

Враховуючи те, що в сипучих, малозв'язних і м'яких породах геологорозвідувальні виробки в багатьох випадках проходять із застосуванням ручної виїмки, у діючих ЄНВ на гірничопрхідницьких роботах наводиться класифікація гірських порід за способами виїмки (табл. 2.8).

Класифікація гірських порід за способами виїмки

Категорія порід за СНВ	Спосіб виїмки
I	Підбиральними і штиковими лопатами
II	Штиковими лопатами з частковим попереднім розпушуванням
III	Штиковими лопатами із суцільним розпушуванням кирками і частково ломами
IV	Штиковими лопатами із суцільним розпушуванням кирками, ломами і частково клинами і молотками
V	Те саме або підривний відбій

Закінчуючи огляд фізико-механічних властивостей гірських порід, необхідно зупинитися на їхній **анізотропії**. Анізотропними називаються породи, властивості яких у різних напрямках різні.

Механічні властивості багатьох порід пов'язані з їхньою **текстурою**. Для осадових порід характерна нашарована текстура, для метаморфічних – сланцювата, причому властивості породи в напрямку, паралельному площинам нашарування або сланцюватості і кліважу, відмінні від тих же властивостей у перпендикулярному напрямку. В анізотропних порід мінімальна твердість, а отже, і максимальна буримість спостерігаються у напрямку, перпендикулярному нашаруванню. Відношення більшої твердості до меншої називається **ступенем анізотропності**. Магматичні породи також можуть бути анізотропними, якщо мають текстуру, що характеризується орієнтованим розташуванням кристалів породотвірних мінералів.

Анізотропні породи при перетинанні їх свердловиною під кутом до площини нашарування або сланцюватості на вибої руйнуються нерівномірно, що приводить до викривлення осі свердловини.

## 2.7. Види руйнування гірських порід при бурінні

Руйнування гірських порід при бурінні можливе двома методами: механічним впливом на породу за допомогою породоруйнівного інструменту і фізичними способами. На цей час буріння свердловин здійснюється в основному породоруйнівними інструментами. Фізичні способи знаходяться в стадії вивчення й експериментування або застосовуються в обмежених об'ємах.

На вибої при впливі породоруйнівними інструментами характер руйнування породи може бути об'ємний, поверхневий і втомний.

При **об'ємному руйнуванні** в точках контакту інструменту з породою виникають напруги, що перевищують твердість породи на вдавлювання, тобто має місце співвідношення

$$\frac{P}{F} > P_{шт}, \quad (2.9)$$

де  $P$  – осьове навантаження на породоруйнівний інструмент, Н;  $F$  – загальна площа контакту інструменту з породою, м<sup>2</sup>;  $P_{шт}$  – твердість породи за вдавлюванням штампа, Па.

**Поверхнєве руйнування** відбувається, коли

$$\frac{P}{F} < P_{шт}. \quad (2.10)$$

При поверхневому руйнуванні різці інструменту не вдавлюються в породу. Цей вид руйнування неефективний, тому що руйнування породи відбувається тільки шляхом стирання інструменту об породу за рахунок сил тертя. Поверхнєве руйнування пов'язане або з недостатнім осьовим навантаженням, або зі збільшенням площі контакту за рахунок зносу (затуплення) ріжучих елементів інструменту.

**Руйнування від утомленості** породи займає проміжне місце між об'ємним й поверхневим і виникає в породі при умовах, аналогічних поверхневому руйнуванню. За рахунок багаторазового силового впливу інструменту в породі розвивається система тріщин, тому твердість її знижується і періодично на вибої виникають умови для об'ємного руйнування.

Процес буріння необхідно здійснювати при об'ємному руйнуванні породи і витягати інструмент для заміни на початку стадії руйнування від утомленості.

Ефективність руйнування порід того самого петрографічного складу знижується з глибиною свердловин. Це відбувається за рахунок ущільнення порід від тиску пластів, що залягають вище. Крім того, у свердловинах, заповнених водою або промивальними рідинами, на породу діє гідростатичний тиск, що негативно впливає на швидкість буріння.

## Висновок

У цьому розділі розглянуті основні фізико-механічні властивості гірських порід, класифікації порід за цими властивостями та методики їх визначення; наведені види руйнування гірських порід при бурінні.

### Контрольні питання

1. Перелічіть основні фізичні властивості гірських порід.
2. Перелічіть основні механічні властивості гірських порід.
3. Для чого необхідне вивчення фізико-механічних властивостей гірських порід?
4. Міцність гірських порід. Класифікація гірських порід за коефіцієнтом міцності.
5. Твердість гірських порід. Яким чином вона визначається? Пружність, пластичність і крихкість гірських порід.
6. Абразивність гірських порід. Класифікація порід за ступенем абразивності.
7. Методи визначення абразивності. Вплив абразивності на процес буріння.
8. Тріщинуватість гірських порід. Класифікація порід за ступенем тріщинуватості.
9. Як визначається кускуватість породи?
10. Буримість гірських порід. Класифікації гірських порід за буримістю.
11. Методи визначення буримості гірських порід.
12. Стійкість гірських порід. Класифікації гірських порід за стійкістю для буріння і проведення гірничих виробок.
13. Що визначають водно-колоїдні властивості порід? Коефіцієнт фільтрації.
14. Вибуховість і розпушуваність гірських порід. Коефіцієнт розпушуваності.
15. Класифікація гірських порід за способами виїмки.
16. Анізотропія властивостей гірських порід. Ступінь анізотропії. Вплив анізотропії на процес буріння.
17. Види руйнування гірських порід при бурінні.