

1.6. ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

1.6.1. ЕНЕРГЕТИЧНІ ЗАКОНИ РУЙНУВАННЯ

Основними енергетичними законами руйнування твердих тіл прийнято вважати закони Ріт-тінгера і Кирпичова.

За законом Ріттінгера (1867 р.), робота, яка витрачається при дробленні твердих тіл, пропорційна площі заново отриманої поверхні роздробленого тіла або ступеня роздробленості.

За законом Кирпичова (1874 р.), енергія, яка необхідна для однакової зміни форми геометрично подібних і однорідних тіл, змінюється так само, як об'єми цих тіл. Цей закон називають також законом подібності і формулюють таким чином: енергія, яка витрачається на дроблення геометрично подібних тіл при однаковому напруженому стані, пропорційна об'ємам цих тіл.

Узагальнення законів дроблення запропоновано П.А. Ребіндером: повна робота при дробленні твердих тіл складається із роботи, витраченої на їх деформування, і роботи на утворення нової поверхні.

За К. Герінгом, енергетика процесу руйнування гірських порід пов'язана з витратами: на роботу спочатку пружної, а потім пластичної деформації з виділенням тепла через внутрішнє тертя;

на інтенсивне дроблення, утворення і розвиток тріщин, формування розривів і кратерів, зумовлені енергетичними витратами на утворення нових вільних поверхонь.

Вагомо впливає на енергетичні витрати в процесі руйнування дисперсність продуктів руйнування, тобто величина, обернена лінійним розмірам тіла. Це зумовлено збільшенням площі утвореної поверхні при кожній наступній стадії дроблення у порівнянні з попередньою. Поглинання енергії при одному і тому ж об'ємі зруйнованої породи зростає, за оцінками Бонда, прямо пропорційно квадрату дисперсності продуктів руйнування.

Утворення нових поверхонь розриву призводить також до поглинання через них енергії на тертя. Значна кількість енергії також розсіюється у вигляді теплоти за рахунок тертя інструменту об породу.

Розміри частинок, утворених у процесі буріння свердловин, можуть бути індикатором ефективності з позицій енергетичних витрат руйнування гірських порід. Якщо при бурінні в продуктах руйнування переважають дрібні фракції, то це свідчить про низьку за енергетичними характеристиками ефективність процесу руйнування. Очевидно, що уникнути дрібних фракцій при бурінні неможливо, але необхідно мінімізувати їх кількість.

1.6.2. МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ВТИСКУВАННІ ІНДЕНТОРІВ

За принципом руйнування гірської породи механічні породоруйнівні інструменти для буріння свердловин поділяють на ріжучо-сколюючі, дробильні і дробильно-сколюючі (рис. 1.25).

При *ріжучо-сколюючій* взаємодії елемент озброєння, переміщуючись зі швидкістю v , зрізує (сколює) гірську породу. Параметри взаємодії: швидкість переміщення v , нормальна P_z і тангенціальна P_t складові сил взаємодії.

При *дробленні* елемент озброєння наносить удари зі швидкістю v по гірській породі, в результаті яких кінетична енергія породоруйнуючого інструменту реалізується через роботу на

деформування і дроблення гірської породи. Параметр взаємодії: кінетична енергія $T_k = mv_y^2/2$, де m — ударна маса.

При *дробильно-сколюючій* взаємодії елемент озброєння наносить удари та втискується під дією сили P_z у породу і одночасно за рахунок ковзання долота, зумовленого його кінематикою, сколює породу з силою P_t . Параметри взаємодії: кінетична енергія T_k , кутова ω і тангенціальна v_t швидкості переміщення, нормальна P_z і тангенціальна P_t складові сил взаємодії.

Загальним у різних схемах взаємодії елемента озброєння долота з породою є наявність нормальної складової P_z сили, під дією якої елемент озброєння втискується у гірську породу, деформує і руйнує її.

У процесі втискування плоского індентора в породу граничний стан може бути досягнутий у двох екстремальних зонах: на контурі, де виникають умови, близькі до чистого зсуву, і на осі симетрії. Ці положення покладені в основу двох механізмів крихкого руйнування гірської породи (рис. 1.26).

Відповідно до *першого механізму руйнування* (Р.М. Ейгелес) при деякому навантаженні на індентор на контурі утворюються кільцеві тріщини, що розповсюджуються вглиб у вигляді конуса (рис. 1.26, а, I). При цьому можливе деяке розкриття тріщини і відсутність тиску на стінку тріщини з боку конуса. Із збільшенням навантаження зростає глибина розвитку тріщини. При подальшому навантаженні індентора поперечна деформація конуса буде обмежуватись навколишньою породою (рис. 1.26, б, I), що сприятиме утворенню бокових тріщин зсуву із наступним руйнуванням породи і утворенням лунки (рис. 1.26, в, I).

За *другим механізмом руйнування* (Н.Н. Павлова і Л.О. Шрейнер) розвиток зони граничного стану на контурі швидко затухає і основну роль відіграє утворення серпоподібної області граничного стану від осі симетрії індентора (рис. 1.26, б, II). Із збільшенням навантаження об'єм граничної області і напружений стан у ній зростають, що призводить до руйнування аналогічно першому механізму (рис. 1.26, в, II).

Руйнування пористих порід при втискуванні індентора характеризуються певними особливостями, пов'язаними з їх ущільненням, що призводить до значних деформацій і утруднює розвиток тріщин відриву. Більшість гірських порід з високою пористістю не дають крихкого руйнування.

У початковий період *втискування сферичного індентора* за контуром утворюється кільцева тріщина (рис. 1.27, а). При досягненні граничного стану в зоні на осі симетрії спостерігається швидке зростання області граничного стану. Подальше збільшення навантаження призводить до сколювання породи за контуром контакту сфери (рис. 1.27, б). Але суттєвого розвантаження, як і руйнування гранично навантаженої зони, контактуючої зі сферою, не спостерігається. Це зумовлено особливістю розподілу контактних тисків під сферичним індентором. Підвищення навантаження на індентор призводить до сколювання або відриву породи з розвантаженням і руйнуванням області граничного стану та утворенням значної лунки крихкого руйнування (рис. 1.27, в).

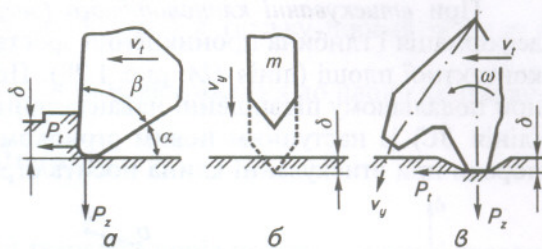


Рис. 1.25. Схеми взаємодії елементів озброєння доліт із гірською породою: а—різання—сколювання; б—дроблення; в—дроблення—сколювання

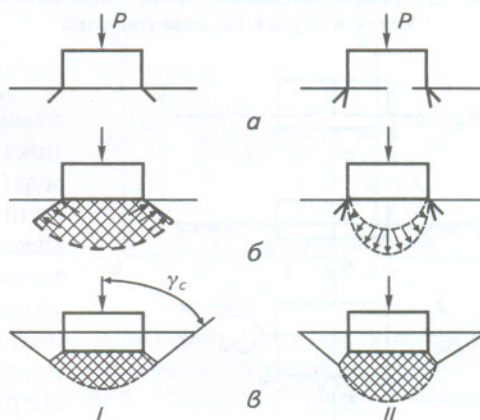


Рис. 1.26. Схема крихкого руйнування гірських порід

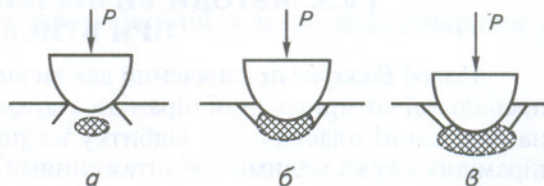


Рис. 1.27. Схема руйнування породи при втискуванні сфери

При втискуванні клиноподібного (загостреного) індентора спочатку має місце пластична деформація і глибина проникнення зростає пропорційно навантаженню внаслідок збільшення контактної площі (лінія OA , рис. 1.28). Потім спостерігається крихке руйнування (лінія AB), а при подальшому підвищенні навантаження відбувається пружнопластична деформація породи (лінія BC) із наступним новим стрибком руйнування (лінія CD) і т. д. Руйнування гірської породи при втискуванні клина носить стрибкоподібний характер.

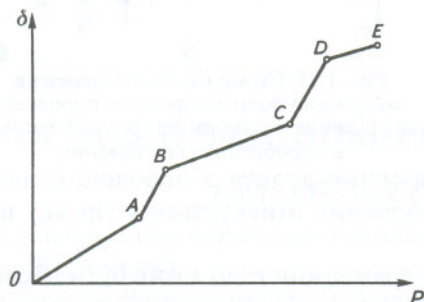


Рис. 1.28. Графік залежності глибини проникнення клина в породу від навантаження

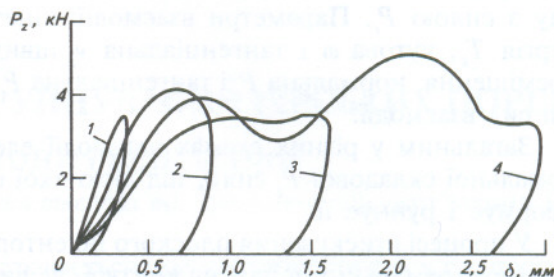


Рис. 1.29. Діаграми динамічного втискування 1,95 мм індентора при енергіях удару:
1—0,8 Дж; 2—2,3 Дж; 3—4,6 Дж; 4—10,5 Дж

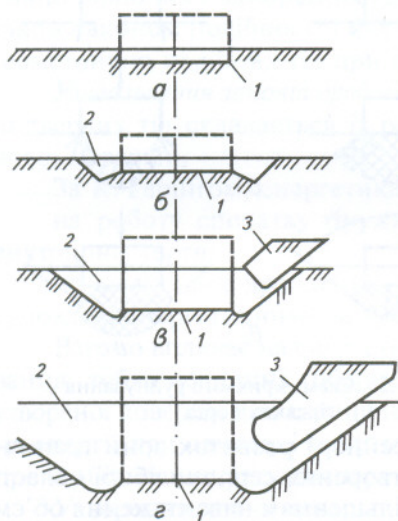


Рис. 1.30. Схема розвитку зон руйнування при динамічній дії індентора:
1—індентор; 2—лунка; 3—уламки породи

Динамічне втискування інденторів у породу характеризується певними особливостями руйнування. На рис. 1.29 показані типові залежності $P_z(\delta)$ при ударі індентора в мармур (за експериментальними даними К.І. Вдовіна). При збільшенні кінетичної енергії удару на кривих випукло виділяються максимуми і мінімуми, зумовлені стрибкоподібним характером руйнування породи. Для однакових кінетичних енергій удару опір породи проникненню індентора з меншою ударною масою дещо більший, ніж із більшою масою. На рис. 1.30 показана кінетика руйнування гірської породи при збільшенні енергії удару.

Для незначної енергії удару (крива 1, рис. 1.29) на поверхні гірської породи виділяється тільки слід від індентора у вигляді зони тріщин на контурі (рис. 1.30, а). При підвищенні енергії удару (крива 2, рис. 1.29) спостерігається крихке руйнування породи під індентором (рис. 1.30, б). Подальше підвищення енергії призводить до суттєвої зміни форми і об'єму руйнування (крива 3 і 4, рис. 1.29; рис. 1.30, в, г) відповідно до законів стрибкоподібного розвитку зон руйнування.

1.6.3. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИ ВТИСКУВАННІ ІНДЕНТОРІВ

Метод Віккерса призначений для визначення твердості гірських порід втискуванням алмазної правильної чотиригранної піраміди з кутом при вершині між гранями $\alpha = 136^\circ$. Метод базується на одержанні пластичного відбитку на поверхні породи при втискуванні індентора (алмазної піраміди) з дуже малими навантаженнями. За міру твердості p_v приймається відношення навантаження P до площі бокової поверхні відбитку:

$$p_v = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

де d — довжина діагоналі відбитку.

При втискуванні алмазної піраміди одержують мікрівідбитки, тому метод Віккерса називають методом мікротвердості. Його використовують для визначення мікротвердості мінералів або гірських порід із розмірами зерен, значно меншими за розмір відбитку.

Метод агрегатної твердості базується на втискуванні в гірську породу різця у вигляді загостреного клина з кутом при вершині $\alpha = 60^\circ$.

Агрегатна твердість P_a визначається відношенням навантаження до площі контакту різця

$$P_a = \frac{P}{2hl \operatorname{tg}(\alpha/2)},$$

де h — глибина лунки;

l — довжина різця.

Метод може використовуватися для оцінки твердості порід при застосуванні бурових доліт із незатупленим озброєнням.

Метод Л. О. Шрейнера базується на статичному втискуванні циліндричного індентора з плоскою основою у породу до її руйнування і одночасному вимірюванню деформаційних характеристик.

При цьому використовують циліндричні зразки гірських порід висотою 30–50 мм і діаметром 40–60 мм з плоскопаралельними відшліфованими поверхнями основ. Індентори діаметром 1,5–2,5 мм виготовляють із інструментальної сталі з наступним її гартуванням або із твердого сплаву. Для випробування гірських порід застосовують спеціальні установки УМГП-3, УМГП-4 та їх аналоги, які забезпечують автоматичну реєстрацію кривих «навантаження–деформація».

В залежності від характеру деформаційних кривих (рис. 1.31) гірські породи поділяють на три класи: крихкі, пластично-крихкі і пластичні. Для порід першого класу (рис. 1.31, а) характерна лінійна залежність між навантаженням і деформацією до моменту крихкого руйнування породи. Для порід другого класу (рис. 1.31, б) закон Гука порушується при навантаженнях, більших за P_0 . У породах третього класу (рис. 1.31, в) для заданих умов випробування не спостерігається крихкого руйнування.

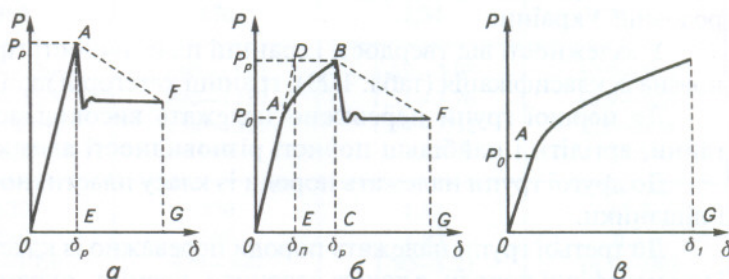


Рис. 1.31. Деформаційні криві гірських порід при втискуванні циліндричних інденторів:

а—крихкі породи; б—пластично-крихкі; в—пластичні

За результатами випробувань зразків гірської породи (рис. 1.31) визначають показники механічних властивостей:

твердість за штампом

$$P_{\text{ш}} = \frac{4P_p}{\pi d_{\text{ш}}^2},$$

де $d_{\text{ш}}$ — діаметр індентора;

границя пластичності

$$P_0 = \frac{4P_0}{\pi d_{\text{ш}}^2},$$

де P_0 — найбільше значення навантаження на прямолінійній ділянці деформаційної кривої (рис. 1.31, б, в);

модуль пружності

$$E = \frac{(1 - \mu^2)P_p}{\delta_n d_{\text{ш}}},$$

де μ — коефіцієнт Пуассона гірської породи;

коефіцієнт пластичності

$$k_n = \frac{A_p}{A_n} = \frac{S_{0ABC}}{S_{0DE}},$$

де A_p — робота деформації до моменту руйнування;

A_n — робота пружної деформації;

S_{0ABC} і S_{0DE} — площі відповідних фігур на рис. 1.31, б.

Для порід першого класу $k_n = 1$, другого класу — $k_n > 1$, а для порід третього класу умовно приймають $k_n = \infty$.

На основі результатів випробувань за методом Л.О. Шрейнера можна одержати оцінку енергетичних затрат при руйнуванні породи. Для цього використовують показник *питомої об'ємної роботи руйнування*

$$A_v = \frac{A'_p}{V_\Lambda} = \frac{mS_{0ABFG}}{V_\Lambda},$$

де A'_p — загальна робота деформації руйнування гірської породи, яка визначається за деформаційною кривою 0AFG (перший клас, рис. 1.31,а) або 0ABFG (другий клас, рис. 1.31,б); m — масштаб графіка «навантаження—деформація» через розмірність роботи; V_Λ — об'єм лунки руйнування, який визначають через масу пластиліну (парафіну), що заповнив лунку, з відомою густиною.

Для порід третього класу загальну роботу деформації визначають умовно екстраполяцією деформаційної кривої до деформації δ_1 , рівній діаметру $d_{ш}$ індентора.

Метод Л.О. Шрейнера знайшов широке застосування при вивченні механічних властивостей гірських порід. У табл. 1.20—1.22 наведені дані механічних властивостей гірських порід основних родовищ України.

У залежності від твердості і границі пластичності гірських порід Л.О. Шрейнером запропонована їх класифікація (табл. 1.23), границі категорій якої уточнені О.І. Співаком і А.М. Поповим.

До першої групи переважно належать високопластичні і сильнопористі гірські породи: глини, аргіліти і найбільш пористі різновидності алевролітів, піщаників та вапняків.

До другої групи належать породи із класу пластично-крихких: вапняки, ангідрити, доломіти і піщаники.

До третьої групи належать породи переважно із класу крихких. Це, в основному, магматичні і метаморфічні породи, а також кварцити, кремінь, окременілі різновидності вапняків і доломітів.

Метод Л.І. Барона і Л.Б. Глатмана призначений для оцінки контактної міцності (твердості) гірських порід при випробуванні зразків нестандартної форми і розмірів з необробленою поверхнею втискуванням циліндричного індентора. Контактна міцність (p_k) визначається як

$$p_k = \frac{4}{\pi n d_{ш}^2} \sum_{i=1}^n P_{pi},$$

де P_{pi} — навантаження на індентор в момент крихкого руйнування породи для i -го дослід; n — кількість дослідів на одному зразку породи.

Між контактною міцністю і твердістю, за методом Л.О. Шрейнера, виявлений кореляційний зв'язок

$$p_k = 0,62 p_{ш}.$$

Для оцінки механічних властивостей гірських порід запропоновані також деякі інші методи.

Метод складного втискування (В.М. Бугайов, Б.В. Байдюк) призначений для визначення механічних властивостей гірських порід при одночасному вертикальному δ_v і горизонтальному δ_r переміщеннях індентора. Відношення δ_r / δ_v , яке названо кінематичним параметром втискування, в процесі дослідів підтримується постійним.

Метод реалізується на установках типу УМГП-3 із спеціальним пристосуванням за схемою, аналогічною методу Л.О. Шрейнера. Додатково визначається показник умовної моментоемності породи

$$M_k = P_p^r / P_p^B,$$

де P_p^r , P_p^B — відповідно горизонтальна і вертикальна складові навантаження у момент руйнування породи.

Результати випробувань за методом складного втискування дають можливість оцінити сколюючо-дробильну дію елементів озброєння долота на гірську породу.

Експрес-метод оцінки механічних властивостей гірських порід за шلامом (Б.В. Байдюк) призначений для оперативної оцінки твердості, міцності на розрив, коефіцієнта тертя та інших показників на основі випробувань частинок шламу. Метод реалізується на малогабаритному приладі ПШ-2 або ПШ-2М. Оцінка твердості здійснюється на основі втискування у підготовлену поверхню шламінки при одночасному боковому ковзанні кульового індентора.

Таблиця 1.20

Механічні властивості гірських порід родовищ Карпатського регіону

Стратиграфічний підрозділ	Порода	Твердість, МПа	Границя пластичності, МПа	Коефіцієнт пластичності	Питома об'ємна робота руйнування A_v , МДж/м³
Воротищенська свита	Аргіліт	640	460	1,88	20,8
Поляницька свита	Піщаник Гравеліт	1780—2620 960	1160—1540 670	1,71—2,47 2,34	41,6—99,7 26,4
Верхньоменілітова свита	Піщаник Алевроліт Аргіліт Піщаник	1130—2390 1080—1570 280—2250 1520	810—1520 890—1280 150—1350 940	1,59—3,08 1,51—3,76 1,54—3,52 1,87	10,9—73,1 10,9—30,4 2,9—53,3 56,5
Середньоменілітова свита	Аргіліт Алевроліт Алевроліт	620 520 730—1050	370 360 470—560	1,68 2,45 1,80—3,21	15,3 6,2 14,0—18,9
Нижньоменілітова свита	Аргіліт Аргіліт	290—400 300—590	270—300 170—350	2,11—2,20 1,98—2,92	3,7—15,0 1,7—12,4
Верхньоголовецька свита	Піщаник Алевроліт Піщаник	800—3020 900—1030 460—2040	600—1500 560—590 390—1680	1,49—2,20 1,78—1,84 2,20—4,04	14,3—97,5 8,9—12,4 41,6—60,5
Нижньоголовецька свита	Аргіліт Аргіліт	1830 390—830	1440 320—690	2,97 2,03—3,10	39,5 4,9
Бистрицька свита	Піщаник Піщаник	750—1720 2240	470—1380 1310	1,71—3,55 2,45	34,0—50,5 29,9
Вигодська свита	Алевроліт Алевроліт	930—2730 2450	590—1610 1310	1,76—2,03 2,42	8,7—124,0 88,2
Манявська свита	Піщаник Піщаник	2350 1520—3910	1410 910—2220	1,97 1,69—4,30	83,0 40,6—141,1
Ямненська свита	Мергель Алевроліт Піщаник	1480 2190—2450 1720—2170	1070 1200—1310 1110—1420	1,89 1,76—2,42 1,99—2,68	— 88,2 51,1—63,0
Стрийська свита	Піщаник Алевроліт Вапняк Гравеліт Конгломерат кварцовий	1490—2870 1650—3180 2070 2520 1530	710—2080 960—1690 1140 1340 890	1,64—2,87 1,92—3,06 2,00 2,79 2,64	21,8—114,8 36,3—80,5 70,2 72,3 —

Таблиця 1.21

Механічні властивості гірських порід Дніпровсько-Донецької западини

Стратиграфічний підрозділ	Порода	Твердість, МПа	Границя пластичності, МПа	Коефіцієнт пластичності	Питома об'ємна робота руйнування A_v , МДж/м ³
Крейда	Крейда	—	20—50	∞	—
	Мергель	150—400	—	1,7—2,3	—
	Піщаник	1000	—	1,1—1,6	—
	Глина	110—160	70—120	4— ∞	—
Юра	Глина	80—160	60—80	5— ∞	—
	Вапняк	2050—2250	1380—1560	1,70—2,1	—
	Піщаник	70—210	50—160	1,2—1,6	—
	Пісок	100—360	60—280	1,4—1,8	—
Тріас	Глина	170—220	80—180	9— ∞	—
	Піщаник	360—750	280—620	1,5—1,6	0,9—2,0
	Вапняк	2000—2420	1760—1850	2,0—2,4	—
	Пісок	100—240	80—180	1,4—1,5	—
Перм	Глина	180—240	100—200	9—10	0,3—0,6
	Піщаник	350—700	180—420	2,4—3,3	—
	Аргіліт	360—1110	280—860	1,5—1,8	3—4
	Ангідрит	960—1000	750—800	1,4—1,6	—
Верхній карбон	Піщаник	450—730	300—470	1,6—1,8	—
	Аргіліт	150—300	110—250	1,3—1,7	0,2—0,5
	Алевроліт	220—330	180—310	1,3—1,6	0,3—2,2
	Вапняк	200—1100	190—500	1,6—1,9	4—5
Середній карбон	Піщаник	450—720	330—470	1,5—2,0	0,8—2,1
	Аргіліт	150—380	120—440	1,3—1,8	0,2—0,6
	Алевроліт	320—1300	250—850	1,4—1,8	0,8—1,0
	Вапняк	300—1120	270—610	1,7—2,0	4,5—5,7
Нижній карбон	Аргіліт	270—770	220—590	1,1—2,1	0,5—1,2
	Алевроліт	510—2250	250—1710	1,3—2,7	0,5—8,2
	Піщаник	620—2090	460—1980	1,5—2,1	0,3—3,3
	Вапняк	880—2040	680—1600	1,4—2,6	0,8—1,4

Таблиця 1.22

Механічні властивості гірських порід родовищ Волино-Подільської окраїни Руської платформи

Стратиграфічний підрозділ	Порода	Твердість, МПа	Границя пластичності, МПа	Коефіцієнт пластичності	Питома об'ємна робота руйнування A_v , МДж/м ³
Нижній карбон	Алевроліт	940	650	1,94	51,1
	Аргіліт	480—610	370—530	1,55—1,71	9,9—13,0
	Вапняк	1640—1750	930—1090	1,87—2,29	27,2
	Піщаник	1040—1670	600—1080	1,55—2,28	25,8—54,3
Верхній девон	Аргіліт	420	280	1,63	12,0
	Доломіт	2450	1860	1,57	50,3
	Вапняк	1320—1950	500—1340	1,54—2,40	17,1—88,5
Середній девон	Аргіліт	1180	920	2,20	16,6
	Доломіт	1640—3280	1180—2150	1,84—2,07	13,0—51,6
	Піщаник	2430—2930	1430—1790	1,49—1,83	24,4—188,0
Нижній девон	Алевроліт	930—1230	640—920	1,63—2,00	23,6—28,3
	Аргіліт	490—770	390—560	1,37—2,04	3,8—19,2
	Піщаник	950—3390	610—2210	1,58—1,83	25,6—129,0
	Гіпсоангідрит	1870	1030	1,88	30,8

Класифікація гірських порід

Група	Категорія	Твердість, МПа	Границя пластичності, МПа
М'які	1	< 100	< 40
	2	100—250	40—110
	3	250—500	110—250
	4	500—1000	250—550
Середні	5	1000—1500	550—850
	6	1500—2000	850—1200
	7	2000—3000	1200—1900
	8	3000—4000	1900—2500
Тверді	9	4000—5000	2500—3500
	10	5000—6000	3500—4200
	11	6000—7000	4200—5100
	12	> 7000	> 5100

1.6.4. ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД В УМОВАХ ВИБОЮ СВЕРДЛОВИНИ

Руйнування гірських порід на вибої свердловини характеризується зміною геостатичного, порового (пластового) і вибійного тисків, динамікою роботи долота, якістю бурового розчину та іншими факторами.

При проникненні індентора або елемента озброєння долота в породу утворюються радіальні і магістральні тріщини (рис. 1.32). Спочатку зароджуються і розповсюджуються вглиб масиву радіальні тріщини, які полегшують подальше руйнування породи. Магістральні тріщини зароджуються в глибині породи і при виході на поверхню утворюють лунку руйнування. Їх розміри визначають ефективність руйнування породи. Магістральні тріщини рівноважні до досягнення критичного стану і є тріщинами нормального відриву.

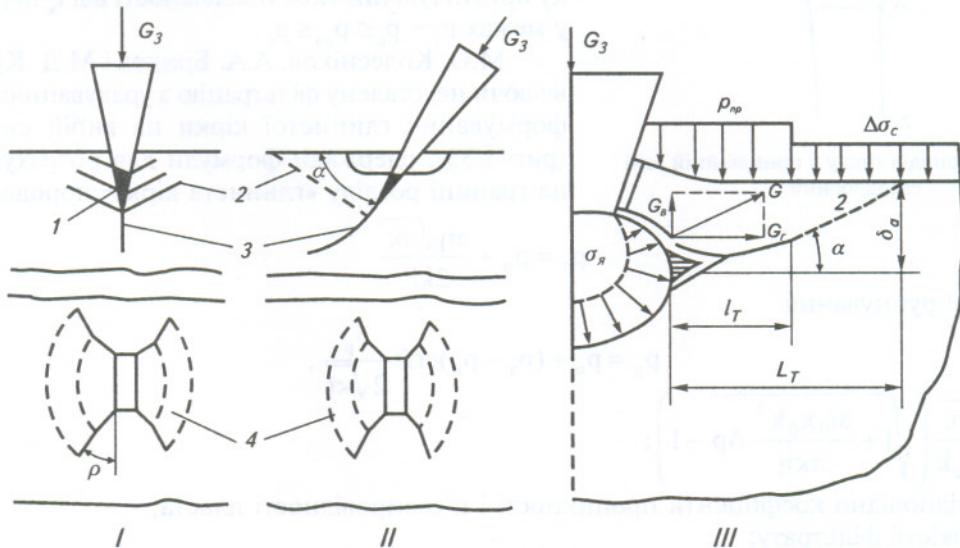


Рис. 1.32. Характер розвитку тріщин у породі при вертикальному проникненні індентора I, III та елемента озброєння долота II:

I—ядро ущільненої породи; 2—магістральні тріщини; 3—головні тріщини; 4—радіальні тріщини

Експериментальними дослідженнями М.О. Колеснікова доведено, що траєкторія радіальних тріщин не залежить від тиску p_c у свердловині. Але під дією тиску p_c у скелеті породи виникають додаткові напруження $\Delta\sigma_c$, які перешкоджають зародженню і розповсюдженню тріщин. У момент росту магістральних тріщин виникає пригнічуючий тиск p_{np} , який утруднює рух магістральних

тріщин і впливає на їх траєкторію і довжину L_T (рис. 1.32). Довжина магістральних тріщин і відповідно об'єм зруйнованої породи різко зменшуються.

При розбурюванні проникних порід під дією перепаду тиску у системі «свердловина—пласт» фільтрат бурового розчину проникає в породу, а дисперсна фаза, частково колюматуючи шар породи, відкладається на її поверхні у вигляді осаду, утворюючи фільтраційну кірку товщиною δ_k . Фільтрат, проникаючи в породу через фільтраційну кірку, викликає перерозподіл тиску на глибині зародження магістральних тріщин (рис. 1.33) і напружень $\Delta\sigma$ у скелеті породи. В результаті по трасі магістральної тріщини буде діяти не пластовий тиск p_n , а інший тиск $p_p > p_n$, рівний динамічному пластовому тиску на глибині руйнування δ_p . Оскільки $p_c > p_p$, то виникає диференціальний тиск (точніше, перепад тиску) $\Delta p = p_c - p_p$.

При розбурюванні непроникних гірських порід тиск на глибині руйнування p_p практично рівний поровому тиску p_n , тобто $\Delta p = p_c - p_n$.

У процесі розвитку магістральних тріщин початковий тиск в їх порожнині p_T близький до нуля (для монолітного скелета). Оскільки $p_c > p_T$, то над частинкою по довжині l_T виникає динамічний перепад тиску, який притискує частинку до масиву породи (рис. 1.32), тобто пригнічує її. Цей перепад тиску на відміну від диференціального тиску називають пригнічуючим тиском (М.Д. Кузьмін і М.О. Колесніков) $p_{np} = p_c - p_T$.

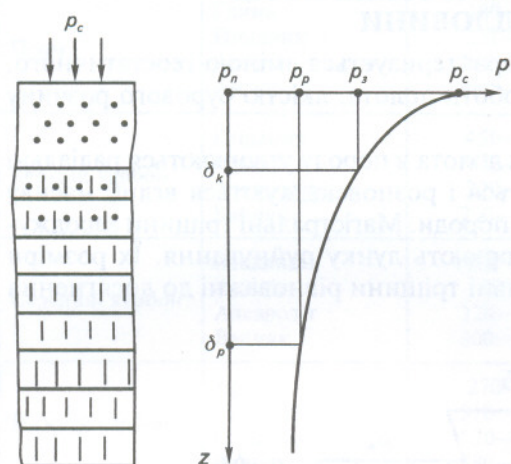


Рис. 1.33. Розподіл тиску у привибійній зоні свердловини

Для заповнення порожнини тріщини рідиною і відновлення в ній тиску необхідний певний час. Тому в залежності від часу контакту t_k елемента озброєння долота з породою величини p_T і p_{np} будуть різними. Якщо t_k менший за час заповнення порожнини тріщини флюїдом, то $p_T \rightarrow 0$ і відповідно $p_{np} = p_c$. Якщо час контакту t_k більший за час заповнення тріщини флюїдом і відновлення в ній тиску до рівня тиску p_p на глибині зони руйнування, пригнічуючий тиск буде дорівнювати диференціальному тиску Δp . У загальному випадку пригнічуючий тиск в залежності від t_k перебуватиме у межах $p_c - p_p \leq p_{np} \leq p_c$.

М.О. Колесніков, А.А. Бриков і М.Д. Кузьмін, вивчаючи неусталену фільтрацію з урахуванням динаміки формування глинистої кірки на вибій свердловини (рис. 1.33), одержали формули для розрахунку тисків на границі розділу «глиниста кірка—порода»

$$p_3 = p_n + \frac{a\eta\sqrt{\pi k}}{2kF} \quad (1.109)$$

і на глибині руйнування

$$p_p = p_n + (p_3 - p_n) \operatorname{erfc} \frac{\delta_p}{2\sqrt{kt}}, \quad (1.110)$$

$$\text{де } a = \frac{F\sqrt{\pi k}}{2r_0 x_0 k} \left(\sqrt{1 + \frac{8r_0 x_0 k^2}{\pi k \eta} \Delta p} - 1 \right);$$

k, κ — відповідно коефіцієнти проникності і п'єзопровідності пласта;

η — в'язкість фільтрату;

F — площа крихкого руйнування породи;

r_0 — питомий об'ємний опір глинистої кірки;

x_0 — об'ємна концентрація твердої фази в буровому розчині;

t — час фільтрації;

$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\tau^2) d\tau$ — інтеграл похибок Гауса;

$$\Delta p = p_c - p_n.$$

Рівняння (1.109)—(1.110) показують, що тиск p_z на границі розділу «глиниста кірка—порода» не залежить від часу фільтрації і визначається, в основному, p_c і p_n , параметрами пласта і якістю бурового розчину. Ці параметри, а також δ_p (через осьове навантаження на долото та швидкість обертання) визначають тиск p_p на глибині руйнування та його розподіл із глибиною.

Виконані М.О. Колесніковим дослідження напруженого стану у вершинах магістральних тріщин показали, що на процес їх зародження при відповідних навантаженнях суттєво впливають не тільки міцність породи, але й напруження в скелеті, фільтраційні властивості порід, якість бурового розчину, диференціальний і пригнічуючий тиски. Основними факторами, які різко погіршують процес розвитку магістральних тріщин і понижують ефективність руйнування гірських порід у вибійних умовах, є напруження в скелеті і пригнічуючий тиск. Із збільшенням пригнічуючого тиску і напружень у скелеті при інших рівних умовах тріщиностійкість гірських порід зростає.

Експериментальні дослідження і результати оціночних розрахунків М.О. Колеснікова показали, що осьові навантаження в глибокому бурінні, які визначаються умовою міцності долота, забезпечують тільки зародження або незначне розповсюдження магістральних тріщин. Руйнування гірських порід на вибої свердловини в таких умовах пов'язане із втратою міцності від втоми, тобто для відриву частинок породи елементами озброєння долота необхідно наносити ряд ударів.