

1.3. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД І ПЛАСТОВИХ ФЛЮЇДІВ

1.3.1. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Фізичні властивості характеризують фізичний стан тіла (в даному випадку — гірської породи) і відображають його якісну і кількісну визначеність, в тому числі також при дії різних фізичних полів. До фізичних властивостей гірських порід належать їх пористість, густина, вологість і т. ін.

Пористість характеризує наявність пустот у гірських породах і кількісно оцінюється *коефіцієнтом загальної пористості*

$$m = \frac{V_p}{V_{gp}},$$

де V_p — загальний об'єм пустот у породі об'ємом V_{gp} .

Пористість гірської породи визначається, в основному, розмірами і формою мінеральних зерен, ступенем їх ущільненості, типом цементу і т. ін. Характерні значення загальної пористості для основних типів осадових порід наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Пористість основних типів осадових порід

Порода	m	Порода	m
Піщаник	0,02—0,35	Доломіт	0,02—0,17
Алевроліт	0,05—0,26	Ангідрит	0,02—0,17
Глина	0,05—0,38	Гіпс	0,13—0,16
Аргіліт	0,02—0,20	Опока	0,35—0,50
Мергель	0,05—0,35	Кремінь	0,01—0,06
Вапняк	0,02—0,23	Крейда	0,25—0,39

Пористість магматичних і метаморфічних гірських порід незначна і рідко перевищує 0,01. Сполучені між собою пори утворюють порові канали, які умовно поділяють на три групи: надкапілярні з розмірами пор понад 0,5 мм; капілярні з розмірами пор від 0,2 мкм до 0,5 мкм; субкапілярні з розмірами пор меншими за 0,2 мкм.

Поряд із загальною розрізняють відкриту або ефективну пористість, яка кількісно оцінюється *коефіцієнтом відкритої (ефективної) пористості*

$$m_e = \frac{V_{pe}}{V_{gp}},$$

де V_{pe} — об'єм відкритих, сполучених між собою пор.

Коефіцієнт відкритої пористості завжди менше коефіцієнта загальної пористості, оскільки в породі є закриті, тобто не сполучені між собою пори.

За характером пустот виділяють гранулярні або порові, тріщинні, кавернові та змішані (тріщинно-порові, тріщинно-кавернові і т. ін.) гірські породи.

Пористість гірських порід визначають за допомогою різних методів.

Метод насичення гірської породи рідиною (як правило, гасом) зводиться до визначення ваги сухого зразка у повітрі G , ваги насиченого гасом зразка у гасі G_1 і ваги насиченого гасом зразка у повітрі G_2 . Відкрита пористість обчислюється за формулою

$$m_e = \frac{G_2 - G}{G_2 - G_1}.$$

Об'єм відкритих пор визначається за об'ємами зразка і зерен з використанням пікнометрів та рідинних і газових порозиметрів. Газові порозиметри дають більш точні оцінки пористості.

Розрізняють мінеральну густину ρ_m , густину скелета ρ_c і власне гірської породи ρ_n .

Мінеральна густина породи визначається відношенням маси сухої мінеральної частини гірської породи M_m до її об'єму V :

$$\rho_m = \frac{M_m}{V} = \frac{M_m}{V_{\text{гп}}(1 - m)}.$$

Мінеральну густину гірських порід знаходять, головним чином, пікнометричним способом для попередньо роздрібленої породи з розмірами частинок, меншими за 2 мм, і висушеної у термостаті при температурі 100—105 °С.

Густина скелета породи визначається відношенням маси M_m сухої мінеральної частини гірської породи до її повного об'єму:

$$\rho_c = \frac{M_m}{V_{\text{гп}}}.$$

Густина гірської породи визначається відношенням суми мас мінеральної частини породи і флюїду, що її насичує, до об'єму:

$$\rho_n = \frac{M_m + M_{\text{ф}}}{V_{\text{гп}}},$$

де $M_{\text{ф}}$ — маса флюїду.

Густина гірських порід змінюється в межах 1600—3500 кг/м³, середня густина Землі значно перевищує густину гірських порід і становить 5520 кг/м³. У табл. 1.4 і 1.5 наведені значення мінеральної густини найбільш розповсюджених типів гірських порід.

Таблиця 1.4

Мінеральна густина деяких типів магматичних і метаморфічних порід

Порода	Густина, кг/м ³		
	мінімальна	середня	максимальна
Магматичні породи			
Граніт	2560	2590	2680
Гранодіорит	2620	2690	2780
Діорит	2670	2810	2920
Габро	2850	2950	3050
Андезит	2170	2490	2680
Базальт	2220	2540	2850
Метаморфічні породи			
Філіт	2400	2450	2700
Сланець слюдястий	2600	2650	2700
Кварцит	2620	2640	2650
Вапняк мармуризований	2650	2670	2680
Мрамур	2680	2700	2720

Мінеральна густина основних типів осадових порід

Порода	Густина, кг/м³		
	мінімальна	середня	максимальна
Піщаник	2580	2670	2760
Алевроліт	2620	2690	2760
Глина	2580	2680	2780
Аргіліт	2600	2680	2780
Мергель	2580	2700	2800
Вапняк	2620	2720	2800
Крейда	2560	2690	2800
Ангідрит	2920	2960	3000
Гіпс	2310	2370	2480
Сіль кам'яна	2120	2160	2220
Опока	2100	3000	3500
Доломіт	2760	2800	2880
Кремінь	2460	2590	2750

Значно впливає на властивості гірських порід (особливо рихлих) наявність у них води, яка може бути у фізично зв'язаному і вільному станах. Для оцінки кількості води, що міститься у породі, використовують показник *вологості* w , %:

$$w = \frac{M_p - M_m}{M_m} \cdot 100,$$

де M_p — маса вологої породи.

Деформування і руйнування гірських порід при створенні зовнішніх механічних навантажень характеризуються механічними властивостями.

Деформування — зміна форми і розмірів тіл під дією зовнішніх сил. *Руйнування* — розрив внутрішніх зв'язків (порушення цілісності) твердого тіла.

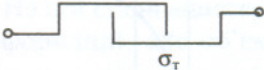
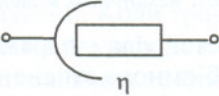
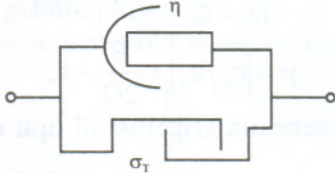
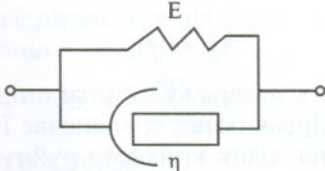
Поведінка твердого тіла у конкретних умовах деформування вивчається з використанням натурних випробувань, випробуванням його фізичних моделей і математичного моделювання.

Перший метод надійніший, але дуже трудомісткий і не завжди може бути реалізований. Другий метод менш надійний, але доступніший. Він базується на використанні теорії подібності і моделювання та широко застосовується при проведенні лабораторних експериментів. Третій метод найменш трудомісткий, але і не такий точний. В його основу покладене математичне моделювання твердого тіла.

При математичному описі механічних процесів деформування гірських порід використовують гіпотези континуума (суцільності) і дисконтинуума (дискретності) середовища. Гіпотеза континуума передбачає неперервність тіла до і під час деформації, тобто відсутність пустот і розривів. Гіпотеза дисконтинуума моделює тіло як дискретне середовище і більш адекватно описує деформування гірських порід, але є значно складнішою. При деформуванні проявляються такі властивості гірських порід, як пружність, пластичність і в'язкість, а при руйнуванні — міцність.

У табл. 1.6 наведені найбільш розповсюджені механічні і математичні моделі твердих тіл (для одновимірних простих деформацій), які можуть бути прийняті для опису деформування

Механічні і математичні моделі твердих тіл

Середовище (рис. 1.1)	Механічна модель*	Математична модель
Лінійнопружне (тіло Гука) (рис. 1.1,а)		$\sigma = E\varepsilon$
Жорсткопластичне (тіло Сен-Венана) (рис. 1.1,б)		$\varepsilon = 0$ при $\sigma < \sigma_T$ $\varepsilon \geq 0$ при $\sigma = \sigma_T$
В'язке (тіло Ньютона) (рис. 1.1,в)		$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$
Пружнопластичне (рис. 1.1,г)		$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ при $\sigma < \sigma_T$ $\varepsilon \geq \frac{\sigma_T}{E}$ при $\sigma = \sigma_T$
В'язкопластичне (тіло Бінгама) (рис. 1.1,д)		$\dot{\varepsilon} = 0$ при $\sigma < \sigma_T$ $\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma - \sigma_T}{\eta}$ при $\sigma \geq \sigma_T$
В'язкопружне (тіло Кельвіна-Фойгта) (рис. 1.1,е)		$\sigma = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}$
В'язкопружне (тіло Максвелла) (рис. 1.1,є)		$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$

* E —модуль пружності; σ —напруження; ε —відносна деформація; σ_T —границя текучості; η —в'язкість; $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$; $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$.

гірських порід. Ідеалізовані моделі пружного, жорсткопластичного і в'язкого тіл є основними. Використовуючи комбінації основних моделей, можна одержати моделі практично всіх тіл. На рис. 1.1 показані графічні залежності механічних моделей твердих тіл. Зокрема моделі в'язкопружних тіл описують явища релаксації напружень і повзучості (рис. 1.1,е,є).

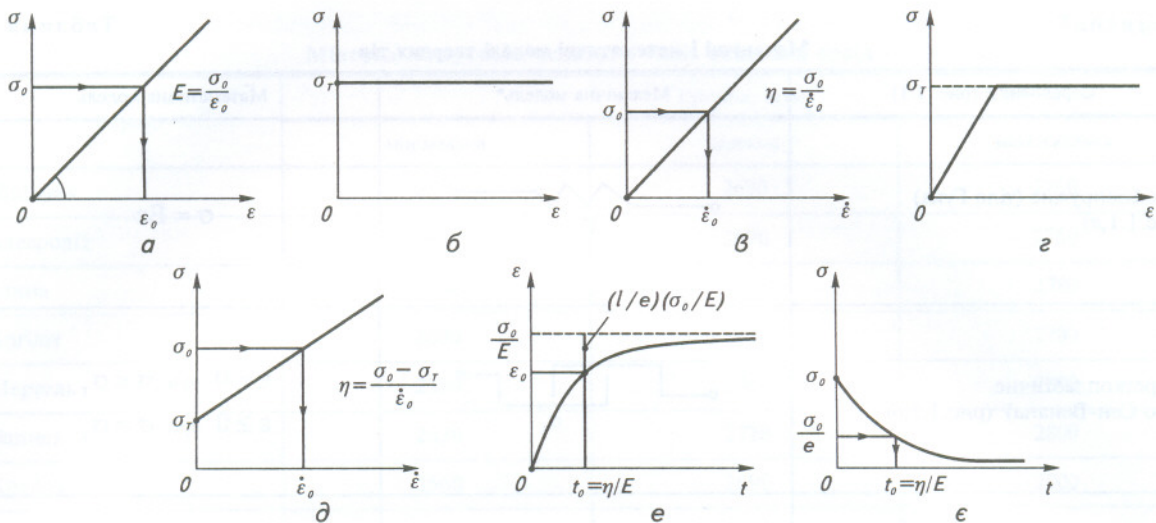


Рис.1.1. Графічні залежності механічних моделей твердих тіл (табл. 1.6)

Показниками механічних властивостей тіла є параметри його моделі (табл. 1.6). Для пружного тіла модулі пружності E , зсуву G , об'ємного стиснення K і коефіцієнт Пуассона μ пов'язані між собою такими залежностями:

$$\begin{aligned} K &= \frac{E}{3(1-2\mu)} = \frac{EG}{3(3G-E)}; \\ G &= \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{3EK}{9K-E}; \\ E &= \frac{9KG}{3K+G} = 3K(1-2\mu); \\ \mu &= \left| \varepsilon_y / \varepsilon_x \right| = \frac{E}{2G} - 1, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де ε_x , ε_y — відносні поздовжня і поперечна деформації при одновимірному поздовжньому навантаженні зразка.

Час релаксації визначається як

$$t_0 = \eta / E. \quad (1.2)$$

Під *міцністю* розуміють здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при дії на нього механічного навантаження. Міцність гірських порід визначає їх несучу здатність. Гірські породи можуть втратити несучу здатність внаслідок крихкого руйнування або пластичної деформації. Міцність гірських порід визначають при простих видах навантаження і за умов всебічного стиснення. Під *простими видами* розуміють механічні навантаження на одноосьове стиснення і розтяг, а також згин і зсув. Міцність гірських порід при простих видах навантаження оцінюється критичними напруженнями на момент руйнування. Умови випробування підбирають таким чином, щоб відхилення від простого механічного навантаження було мінімальним.

Випробування на *одноосьове стиснення* здійснюють на зразках гірських порід правильної циліндричної форми. Відповідно до Міжнародного стандарту, прийнятого Міжнародним бюро з механіки гірських порід, при випробуваннях слід дотримуватися таких вимог:

1. Форма зразків циліндрична з діаметром $d = 40-45$ мм. Відношення $d : l = 1 \pm 0,05$ (l — довжина зразка). Торцеві поверхні зразків шліфуються. Відхилення від паралельності торців не більше 0,05 мм за діаметром основ зразка, а відхилення від перпендикулярності торців до твірної циліндра не більше 0,05 мм. Випуклість торців не більше 0,003 мм.

2. Випробувальний прес повинен мати поліровані плити, одна з яких на кульовій опорі.

3. Швидкість навантаження 0,5—1,0 МПа/с.

Зразок гірської породи деформується до руйнування. У процесі випробування фіксується навантаження і деформація зразка породи, на основі чого визначаються механічні властивості. На рис. 1.2 показана характерна залежність між навантаженням P на гірську породу і деформацією Δl при одноосьовому стисненні, на якій виділені типові області.

В області 1 відбувається закриття пор і мікротріщин, об'єм зразка зменшується. Крива поздовжніх деформацій характеризується випуклістю вниз, поперечні деформації збільшуються. Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона зростають.

В області 2 приріст деформації пропорційний приросту навантаження. Модуль пружності і коефіцієнт Пуассона постійні.

В області 3 навантаження досягає критичного значення, починається стадія утворення мікротріщин. На цій стадії спостерігається прискорене зростання поперечних деформацій, але об'єм зразка продовжує зменшуватись.

В області 4 має місце некероване зростання тріщин. Закінчується безпечна стадія зростання мікротріщин і починається друга, некерована стадія їх лавинного зростання і зливання, яка може мати місце навіть при постійному навантаженні. Коли тріщиноутворення досягає максимальної швидкості, починається розгалуження тріщин і напруження в цьому випадку відповідають граничній міцності породи при даному типі і характері навантаження. Саме з цього моменту починається процес макроскопічного руйнування. На даній стадії швидко збільшуються поперечні деформації, а також об'єм зразка за рахунок збільшення ступеня розрихлення.

В області 5 з розвитком процесу руйнування при випробуванні зразків порід виникають розриви внутрішніх зв'язків, які викликають локальну нестійкість в елементах зразка. Наявність таких областей локальної втрати стійкості не викликає вичерпання стійкості і несучої здатності зразка породи в цілому внаслідок наявності зв'язків між окремими його частинами. Це призводить до появи на діаграмі падаючої ділянки кривої.

Міцність породи на стиснення σ_c оцінюється за максимальним навантаженням P_c у момент руйнування:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S},$$

де S — площа поперечного перерізу зразка породи.

Якщо відношення d/l суттєво відрізняється від одиниці, то необхідно виконати перерахунок міцності за емпіричною формулою

$$\sigma_c = \frac{9\sigma'_c}{7 + 2d/l},$$

де σ'_c — міцність нестандартного зразка породи.

Модуль пружності при стисненні визначається по кривій у другій області (рис. 1.2):

$$E_c = \frac{(P_a - P_b)l}{S(\Delta l_a - \Delta l_b)}.$$

Вимірювання поперечної деформації зразка, тобто зміни його діаметра, в процесі випробування дозволяє визначити коефіцієнт Пуассона

$$\mu_c = \frac{(\Delta d_a - \Delta d_b)l}{d(\Delta l_a - \Delta l_b)}.$$

Випробування на *одноосьовий розтяг* гірських порід пов'язане з технічними труднощами, зумовленими складністю виготовлення та кріплення зразків. Найбільш точним є метод прямого розтягу циліндричних зразків, кінці яких заливаються сплавом Вуда. Так само як і при випробуванні на стиснення можуть бути одержані показники міцності σ_p , модуля пружності E_p і коефіцієнта Пуассона μ_p при розтягу.

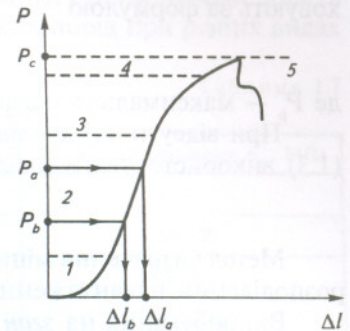


Рис. 1.2. Характерна залежність між навантаженням на гірську породу і деформацією при одноосьовому стисненні

Для визначення міцності на розтяг широко використовуються непрямі методи, наприклад, метод стиснення циліндричних зразків по твірній рівномірно розподіленим навантаженням, прикладеним до діаметрально протилежних твірних. Руйнування зразка відбувається через розвиток тріщин від точок прикладання навантаження до центру. Міцність зразка на розтяг розраховують за формулою

$$\sigma_p = \frac{2P_p}{\pi d l} (1 + \mu)(1 + 2\mu), \quad (1.3)$$

де P_p — максимальне навантаження в момент руйнування зразка.

При відсутності дослідних даних про коефіцієнт Пуассона допускається замість формули (1.3) використовувати наближену формулу

$$\sigma_p = \frac{P_p}{d l}. \quad (1.4)$$

Метод визначення міцності на розтяг стисненням циліндричних зразків по твірній рівномірно розподіленим навантаженням рекомендований Міжнародним бюро з механіки гірських порід.

Випробування на *згин* гірських порід здійснюється на циліндричних або призматичних із прямокутним перерізом зразках при відношеннях $(l/h, l/d) > 8$, щоб виключити вплив поперечних сил (h — висота прямокутного поперечного перерізу, l — довжина зразка). Міцність на згин обчислюють за формулою

$$\sigma_3 = \frac{M_3}{W},$$

де M_3 — максимальний згинаючий момент при випробуванні зразка до руйнування;

$W = \frac{\pi d^3}{32}$, $W = \frac{bh^2}{6}$ — моменти опору круглого і прямокутного перерізів зразка згину;
 b — ширина прямокутного перерізу.

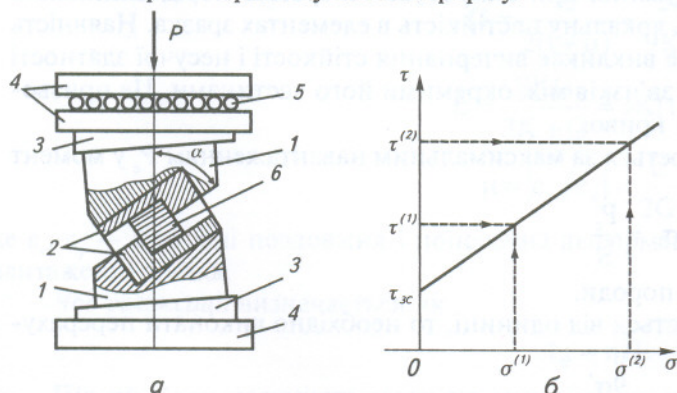


Рис. 1.3. Схема випробування (а) і обробка результатів (б) при зрізі із стисненням:

1—матриці; 2—вкладиші; 3—клини; 4—плити;
 5—ролики; 6—зразок породи

У випадку реєстрації навантаження і деформації точок прикладання сили можна визначити модуль пружності при згині.

Показники механічних властивостей гірських порід при зсуві визначають в процесі випробувань на зріз і кручення. На рис. 1.3,а показана схема випробування зразка на зріз із стисненням (косий зсув). Використовують циліндричні зразки діаметром $42 \pm 0,1$ мм і висотою $42 \pm 2,5$ мм. Допуски на паралельність, випуклість торців, а також їх перпендикулярність до твірної циліндра $0,05$ мм. Кути нахилу матриць $30, 45$ і 60° , клинів 5° , що дає змогу змінювати кут нахилу α зрізу в межах від 25 до 65° через кожні 5° .

Після випробування зразка розраховують за максимальним навантаженням P нормальні σ і дотичні τ напруження у перерізі зрізування:

$$\sigma = \frac{P}{S} \sin \alpha,$$

$$\tau = \frac{P}{S} \cos \alpha,$$

де α — кут нахилу площини зрізу до лінії дії сили P (рис. 1.3,а);

S — площа перерізу зсуву (для циліндричного зразка $S = dl$).

Випробування проводять при декількох значеннях кута α для побудови рівняння прямолінійної ділянки діаграми (рис. 1.3,б)

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + \tau_{zc}, \quad (1.5)$$

де τ_{zc} — міцність на зсув;

ϕ — параметр інтенсивності росту міцності на зсув із збільшенням нормального навантаження.

У табл. 1.7 і 1.8 наведені оціночні значення деяких механічних властивостей гірських порід, на які впливають багато факторів (склад, структура, текстура, насиченість флюїдом, вид випробування та ін.). Тому діапазони зміни показників властивостей для однієї і тієї ж породи досить широкі. У табл. 1.9 даються оцінки відносної міцності деяких гірських порід при різних видах простих навантажень.

Таблиця 1.7

Пружні властивості і міцність на стиснення гірських порід

Породи	Модуль пружності $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Міцність на стиснення σ_c , МПа
Глинисті сланці	1,5—2,5	0,10—0,20	—
Піщаники	3,3—7,8	0,30—0,35	28—80
Вапняки	1,3—3,5	0,15—0,30	80—260
Доломіти	2,1—16,5	0,15—0,30	200—260
Граніти	>6	0,26—0,29	—
Базальти	>9,7	0,20—0,25	90
Аргіліти	3—6	0,10—0,25	50—100
Алевrolіти	3—7	0,20—0,30	40—120

Таблиця 1.8

**Значення коефіцієнта Пуассона і міцності на розтяг для гірських порід
Дніпровсько-Донецької западини за даними «УкрНДІгазу»**

Породи	Коефіцієнт Пуассона μ	Міцність на розтяг σ_p , МПа
Супіщано-глинисті	0,05—0,20	0,1—1,0
Глини пластичні	0,35—0,45	0,5—1,0
Глини крейдо-мергельні	0,10—0,20	1,0—1,5
Вапняки	0,15—0,35	4,0—17,0
Піщаники	0,20—0,35	0,1—12,0
Піщаники дрібнозернисті	0,23—0,28	5,0—8,0
Піщаники крупнозернисті	0,30—0,33	3,0—6,0
Алевrolіти	0,20—0,30	3,0—13,5
Аргіліти	0,10—0,25	2,5—8,0
Ангідрити	0,30—0,40	3,0—7,0
Доломіти	0,15—0,30	5,0—9,0
Кам'яна сіль	0,35—0,45	2,0—3,5

Таблиця 1.9

Відносна міцність гірських порід

Породи	Стиснення	Зсув	Згин	Розтяг
Глинисті сланці	1,00	—	0,28	0,12
Піщаники	1,00	0,10—0,12	0,06—0,20	0,02—0,05
Гіпси	1,00	—	0,35	0,11
Вапняки	1,00	0,15	0,08—0,10	0,04—0,10

За результатами випробувань на одноосьове стиснення або поперечний згин можна оцінити границю текучості і в'язкість гірської породи. Випробування проводять при постійному навантаженні на зразок із заміром його деформації (повзучість) та при постійній деформації зразка із заміром зміни навантаження у часі (релаксація) (див. рис. 1.1, *е, є*). У досліджах використовують циліндричні зразки з кернавого матеріалу і штучні зразки, виготовлені із роздрібненого кернавого матеріалу або шламу методом пресування за методикою В.С.Войтенка.

Основна перевага штучних зразків полягає в їх однорідності за складом і фізико-механічними властивостями. Це дозволяє робити кількісну оцінку впливу різних факторів на напружено-деформований стан гірських порід за результатами випробувань мінімальної кількості зразків.

Штучні зразки, виготовлені методом пресування, мають надлишкову внутрішню енергію, тобто перебувають у термодинамічно нерівноважному стані. Тому перед випробуванням їх піддають процесу старіння. Цей процес можна прискорити нагріванням у автоклаві при температурі, яка не викликає мінералогічних або структурних змін.

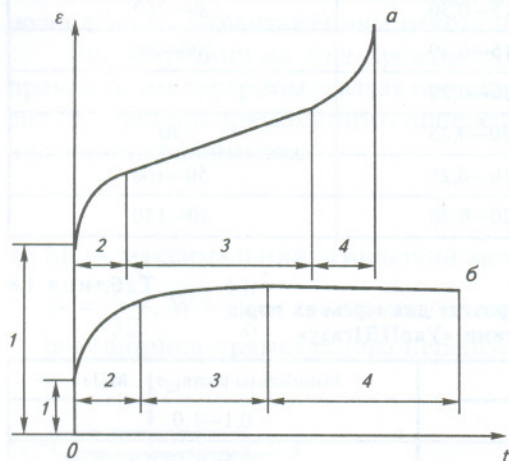


Рис. 1.4. Діаграми повзучості гірських порід

Стабільні результати одержують тільки для стадії усталеної повзучості, що дозволяє використовувати їх для оцінки границі текучості і в'язкості гірських порід.

Для знаходження цих параметрів одержують криві повзучості зразка гірської породи при різних осьових навантаженнях або нормальних напруженнях σ_i (зрозуміло, менших за міцність), на основі яких для стадії усталеної повзучості визначають градієнт швидкості деформації $\dot{\epsilon}_i = \Delta \epsilon_i / \Delta t_i$ (рис. 1.5, *а*). Обробку даних здійснюють, як правило, для простих моделей, наприклад, Бінгама (табл. 1.6). На рис. 1.5, *б* показана залежність $\sigma_i(\dot{\epsilon}_i)$, апроксимацією якої знаходять границю текучості σ_T і в'язкість η породи.

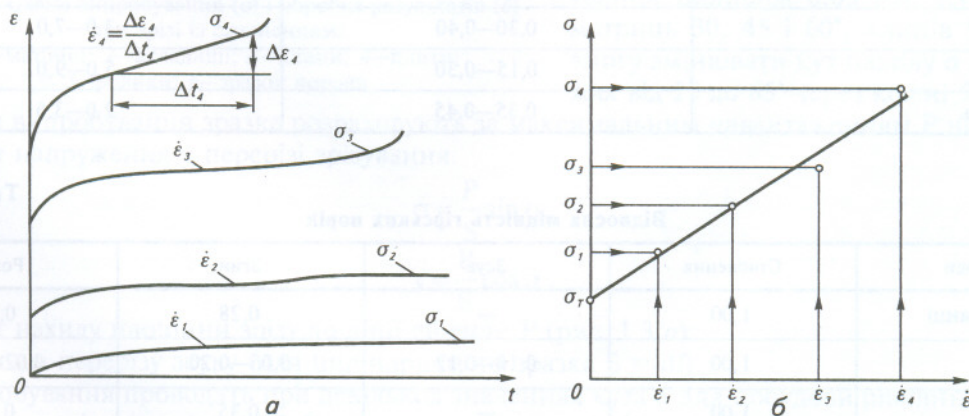


Рис. 1.5. Схема побудови механічної моделі за результатами випробування на повзучість: *а* — криві повзучості при різних напруженнях σ_i ; *б* — механічна модель

Для механічної моделі Бінгама ці параметри визначають за формулами

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i^2 - \sum_{i=1}^n \sigma_i \dot{\epsilon}_i \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i}{n \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i \right)^2};$$

$$\eta = \frac{n \sum_{i=1}^n \sigma_i \dot{\epsilon}_i - \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i \sum_{i=1}^n \sigma_i}{n \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i \right)^2},$$
(1.6)

де n — кількість дослідів при різних значеннях осьових напружень σ_i .

Емпіричні оцінки дисперсій адекватності S_a^2 , границі текучості $S_{\sigma_{\tau}}^2$ і в'язкості S_{η}^2 породи для даного випадку обчислюються з допомогою таких формул:

$$S_a^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (\sigma_{\tau} + \eta \dot{\epsilon}_i - \sigma_i)^2;$$

$$S_{\sigma_{\tau}}^2 = \frac{S_a^2 \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i^2}{n \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i \right)^2};$$

$$S_{\eta}^2 = \frac{n S_a^2}{n \sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \dot{\epsilon}_i \right)^2}.$$
(1.7)

Приклад 1.1. Визначимо границю текучості і в'язкість породи за результатами дослідів на одноосьове стиснення: $\sigma_i = \{1,5; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5\}$ МПа; $\dot{\epsilon}_i = \{4,2 \cdot 10^{-8}; 6,3 \cdot 10^{-8}; 7,9 \cdot 10^{-8}; 9,6 \cdot 10^{-8}; 13,1 \cdot 10^{-8}\}$ с⁻¹.

Обчислимо суми: $\sum \sigma_i = 10 \cdot 10^6$; $\sum \dot{\epsilon}_i = 41,1 \cdot 10^{-8}$; $\sum \sigma_i \dot{\epsilon}_i = 0,8731$; $\sum \dot{\epsilon}_i^2 = 3,8351 \cdot 10^{-14}$. За формулами (1.6) одержимо оцінки границі текучості $\sigma_{\tau} = 1,08$ МПа та в'язкості $\eta = 1,12 \cdot 10^7$ МПа·с, а за формулами (1.7) — емпіричні оцінки дисперсій $S_a^2 = 0,0027$ МПа²; $S_{\sigma_{\tau}}^2 = 0,0046$ МПа² і $S_{\eta}^2 = 6,0 \cdot 10^{11}$ (МПа·с)².

У табл. 1.10 наведені дані в'язкопружних властивостей деяких гірських порід. Досліди показують, що в'язкість і пластичні властивості суттєво залежать від складу, будови, насиченості гірських порід, способу випробування, температури та інших факторів. Наприклад, із збільшенням температури і вологості зразків кам'яної солі границя текучості і в'язкість зменшуються.

Таблиця 1.10

В'язкопружні властивості гірських порід

Породи	В'язкість, МПа·с	Час релаксації $t_0 \cdot 10^{-5}$, с
Вапняк зеленогофенський	10^{14}	10^5
Піщаники	$(2,34-3,52) \cdot 10^3$	1,72—2,59
Піщані сланці	$(2,15-7,16) \cdot 10^3$	2,59—8,64
Глинисті сланці	$(15-20) \cdot 10^3$	25,92—34,56
Глини	—	8,64—17,28

Основні схеми вивчення механічних властивостей гірських порід в умовах всестороннього стиснення показані на рис. 1.6.

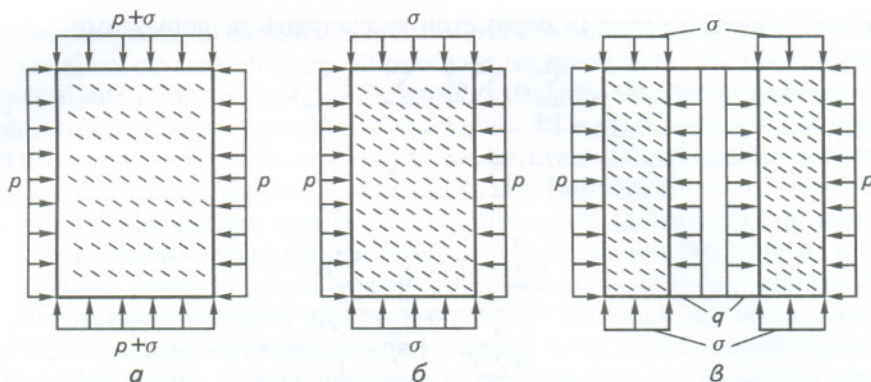


Рис. 1.6. Основні схеми випробування зразків порід при всесторонньому стисненні:
а—схема Кармана; б—схема Бокера; в—пустотілий циліндр

За схемою Кармана (рис. 1.6,а) випробовуються циліндричні зразки у тонкій гумовій оболонці, попередньо навантажені всестороннім рівномірним тиском p та нагріті до необхідної температури. У процесі випробування механічне навантаження здійснюється на торцеві поверхні зразка, а бокове навантаження — тиском. Таким чином, осьові напруження будуть дорівнювати $\sigma + p$; збільшуючи напруження σ , викликані механічним навантаженням, можна вивчати деформацію зразка породи.

За схемою Бокера (рис. 1.6,б) на зразок породи створюється боковий тиск, який на відміну від схеми Кармана не передається на торцеві поверхні. Осьові напруження σ створюються механічним навантаженням незалежно від бокового тиску p та можуть бути меншими за p .

За третьою схемою (рис. 1.6,в) випробовуються пустотілі циліндри, що дає змогу вибором σ , p та q моделювати неоднорідний напружений стан гірської породи в околі стовбура свердловини.

Випробування при рівномірному всесторонньому стисненні проводяться для вивчення коефіцієнта β об'ємного стиснення гірських порід:

$$\beta = -\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dp}, \quad (1.8)$$

де V_0 — початковий об'єм породи при нормальних тиску і температурі.

У табл. 1.11 наведені значення β для деяких мінералів і гірських порід, які одержані при двох значеннях тиску.

Таблиця 1.11

Коефіцієнт об'ємного стиснення деяких мінералів і гірських порід за даними Адамса

Мінерал, гірська порода	$\beta \cdot 10^3, \text{МПа}^{-1}$	
	$p = 196 \text{ МПа}$	$p = 981 \text{ МПа}$
Алмаз	0,18	0,18
Кальцит	1,42	1,42
Польові шпати	1,54—1,86	1,36—1,71
Кварц	2,86	2,35
Кам'яна сіль	4,09	3,60
Граніт	2,16	1,92

Коефіцієнт об'ємного стиснення гірських порід із збільшенням тиску, як правило, зменшується в більшій мірі, ніж коефіцієнт об'ємного стиснення мінералів, що їх складають. Це значною мірою зумовлено ущільненням порід за рахунок зменшення об'єму пор. Для мінералів зменшення коефіцієнта β з ростом тиску не може бути пояснене ущільненнями. В даному випадку головну роль відіграють закономірності росту сил відштовхування при зближенні частинок.

До **теплофізичних властивостей гірських порід** належать теплопровідність (λ), питома (масова) теплоємність (c), температуропровідність (a), коефіцієнти теплового лінійного (α_t) і об'ємного (β_t) розширення.

Теплопровідність характеризує інтенсивність процесу передачі тепла в тілі, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить через одиницю площі ізотермічної поверхні за одиницю часу при градієнті температури, рівному одиниці. Коефіцієнт теплопровідності визначається із закону Фур'є:

$$\lambda = \frac{1}{S \text{grad } T} \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (1.9)$$

де ΔQ — кількість теплоти, яка проходить через площу S за час Δt ;

$\text{grad } T$ — температурний градієнт.

Питома (масова) теплоємність тіла при постійному тиску (об'ємі) визначається кількістю теплоти, необхідної для підвищення температури тіла одиничної маси на один градус:

$$c = \frac{1}{M} \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (1.10)$$

де M — маса тіла,

ΔT — різниця температур.

Теплоємність гірських порід при постійних тиску і об'ємі приблизно однакова.

Температуропровідність характеризує швидкість вирівнювання температури тіла при нестационарній теплопровідності, тобто швидкість розповсюдження ізотермічних границь в тілі:

$$a = \lambda / c\rho, \quad (1.11)$$

де ρ — густина тіла.

Коефіцієнти теплового лінійного і об'ємного розширення визначаються відповідно формулами

$$\alpha_t = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT}; \quad (1.12)$$

$$\beta_t = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT}, \quad (1.13)$$

де L_0 , V_0 — початкові лінійний розмір і об'єм тіла.

Коефіцієнти α_t і β_t залежать від пружних властивостей твердого тіла. За Грюнайzenом, має місце залежність

$$\frac{\beta_t K}{c} = \text{idem}, \quad (1.14)$$

де K — модуль об'ємного стиснення.

Для ізотропних порід ($\beta_t \approx 3\alpha_t$) формула (1.14) еквівалентна залежності

$$\frac{\alpha_t E}{c(1-2\mu)} = \text{idem}. \quad (1.15)$$

У табл. 1.12 наведені мінімальні, середні і максимальні значення теплопровідності, температуропровідності та питомої теплоємності для основних типів гірських порід.

Таблиця 1.12

Теплофізичні параметри основних типів гірських порід

Порода	λ , Вт/(м·К)			$a \cdot 10^7$, м²/с			c , Дж/(кг·К)		
	$\lambda_{\min}$	λ_c	$\lambda_{\max}$	$a_{\min}$	a_c	$a_{\max}$	$c_{\min}$	c_c	$c_{\max}$
Магматичні									
Габро	1,59	2,41	2,98	9,32	9,72	12,17	897	1005	1130
Діорит	1,38	2,20	2,89	3,32	6,38	8,64	1118	1136	1168
Граніт	1,12	2,42	3,85	3,33	9,62	16,50	257	936	1548
Гранодіорит	0,97	2,18	3,31	3,05	5,15	7,50	741	1057	1256
Андезит	1,42	2,28	2,79	6,17	6,31	6,44	808	817	823

Порода	λ , Вт/(м·К)			$a \cdot 10^7$, м²/с			c , Дж/(кг·К)		
	$\lambda_{\min}$	λ_c	$\lambda_{\max}$	$a_{\min}$	a_c	$a_{\max}$	$c_{\min}$	c_c	$c_{\max}$
Метаморфічні									
Сланець	0,65	2,34	4,76	2,87	9,46	22,5	699	982	1643
Гнейс	0,94	2,02	4,86	6,30	7,32	8,26	754	979	1176
Мармур	1,59	2,56	4,00	7,80	11,03	12,00	753	857	879
Кварцит	2,68	5,26	7,60	13,60	18,08	20,90	718	1046	1331
Роговик	2,12	3,39	6,10	13,44	14,54	15,64	1478	1480	1482
Осадіві									
Конгломерат	1,05	1,92	3,86	6,30	7,89	11,50	754	796	837
Піщаник	0,24	1,81	4,41	2,00	9,58	19,72	544	925	1629
Алевроліт	0,22	1,65	3,79	4,30	10,40	16,10	322	894	1466
Аргіліт	0,25	1,32	3,12	2,10	7,84	11,60	508	846	1004
Глина	0,12	1,60	3,10	0,51	5,88	11,56	419	1361	3546
Доломіт	1,63	3,24	6,50	8,26	12,44	16,80	648	1088	1465
Вапняк	0,64	2,37	4,37	3,55	10,27	17,28	623	897	1273
Мергель	0,50	1,96	3,61	3,14	7,13	13,89	586	1909	3100
Крейда	0,82	1,58	2,22	3,13	4,77	6,20	837	1935	3915
Кам'яна сіль	1,67	3,64	5,50	11,20	15,60	17,70	1477	2557	4615

1.3.2. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАСТОВИХ ФЛЮЇДІВ

Фізичні властивості **нафти** — густина, коефіцієнт об'ємного стиснення, реологічні властивості та ін.

Густина нафти — один із основних показників її товарної якості. Густина нафти визначається її складом і при стандартних умовах (температурі 20°C і атмосферному тиску) перебуває у межах 760—1000 кг/м³. Рідко зустрічаються нафти з густиною, що виходить за ці межі.

Густину нафти в лабораторних умовах вимірюють з допомогою нафтоденсиметрів і пікнометрів при стандартних умовах. Використання пікнометрів забезпечує більш високу точність вимірювання густини.

У пластових умовах густина нафти менша, ніж виміряна на поверхні, оскільки в пластових умовах нафта вміщує розчинені гази.

Коефіцієнт об'ємного стиснення нафти (β), який визначається аналогічно (1.8), перебуває у межах $(4...70) \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹. Стисливість нафти в значній мірі залежить від кількості розчиненого газу, тиску і температури.

Реологічні властивості нафти характеризують залежність між напруженнями зсуву і деформаціями при її течії. Найбільш вживаними реологічними моделями, що описують течію нафт, є моделі Ньютона

$$\tau = \eta \dot{\gamma}; \quad (1.16)$$

Оствальда

$$\tau = k \dot{\gamma}^n; \quad (1.17)$$

Шведова—Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \quad (1.18)$$

де τ — напруження зсуву;

$\dot{\gamma} = d\gamma / dt$ — градієнт швидкості зсуву;

τ_0 , η — динамічне напруження зсуву і в'язкість рідини;

k , n — міра консистенції і показник нелінійності рідини.

Графіки реологічних моделей Ньютона і Шведова—Бінгама показані на рис. 1.1, в, д, а на рис. 1.7 — Оствальда.

Рідина Оствальда з показником нелінійності $n < 1$ називається *псевдопластичною*, а із $n > 1$ — *дилатантною*.

Нафти у реологічному відношенні в більшості випадків описуються рівнянням Ньютона (1.16). Наявність у складі нафти твердих парафінів, асфальтосмолистих та інших речовин надає їм в'язкопластичних і в'язкопружних властивостей.

Реологічні властивості нафти визначаються її складом і змінюються в широких межах, наприклад, для в'язких рідин від 0,001 до 0,15 Па·с і більше. На реологічні властивості нафти суттєво впливають тиск і особливо температура. З підвищенням температури реологічні властивості нафти зменшуються.

Реологічні властивості нафти вимірюють з допомогою віскозиметрів ротаційного або капілярного типів. Методика обробки даних віскозиметрії детально розглянута в розділі 3.7.1 (том 2).

Реологічні властивості нафт у пластових умовах визначають на спеціальних віскозиметрах або установках, які моделюють пластові температури і тиски.

Поверхневий натяг визначається витраченою енергією для ізотермічного утворення одиниці площі вільної поверхні рідини. Поверхневий натяг рідини залежить від природи і складу контактуючих фаз, тиску і температури. Він є результатом дії молекулярних сил, які у різних речовин неоднакові. Сили взаємодії молекул рідини з молекулами твердого тіла можуть бути більшими за сили взаємодії між молекулами рідини. Молекулярні сили взаємодії між водою і породою більші, ніж між нафтою і водою. Це може призвести до витиснення нафти водою з дрібних пористот породи в більш великі, тобто до міграції нафти в гірських породах.

Поверхневий натяг нафти і води на границі з газом перебуває у межах від 5 до 70 мН/м і зменшується із збільшенням тиску і температури. Поверхневий натяг на границі «нафта—вода» в багатьох випадках перебуває у межах від 20 до 30 мН/м, але в залежності від мінералізації води, вмісту в нафті активних компонентів (смоли, асфальтени, нафтені кислоти і т. ін), тиску, температури може змінюватись у більш широких межах.

Прилади для визначення поверхневого натягу ґрунтуються на вимірюванні сили, необхідної для розриву поверхні міжфазового розділу по периметру певної довжини. Найбільшого розповсюдження дістали методи відриву крапель, відриву пластини, відриву кільця.

Наявність на границі розділу фаз надлишкової поверхневої енергії зумовлює прагнення системи зайняти таке положення, при якому її площа поверхні була б мінімальною. При контакті трьох фаз, коли одна з них тверда, прагнення системи до мінімуму поверхневої енергії проявляється через змочування.

Якщо на поверхню твердого тіла нанести краплю рідини, то після настання рівноваги вона прийме ліноподібну форму (рис. 1.8, а), зумовлену взаємодією трьох поверхневих натягів: на границях краплі з твердим тілом σ_{1-3} , краплі з навколишнім середовищем (рідиною або газом) σ_{1-2} та твердого тіла з навколишнім середовищем σ_{2-3} .

Поверхневий натяг σ_{1-3} на границі твердого тіла з краплею рідини намагатиметься зменшити площу їх контакту, цьому перешкоджатиме поверхневий натяг σ_{2-3} на границі твердого тіла з навколишнім середовищем, а внесок поверхневого натягу на границі з навколишнім середовищем буде залежати від кута θ , який σ_{1-2} утворює з поверхнею твердого тіла. Після нанесення на поверхню крапля буде розтікатись по ній доти, поки не настане рівновага трьох поверхневих натягів. Проектуючи σ_{1-2} на поверхню твердого тіла, одержимо рівність, яка відповідає мінімуму поверхневої енергії при контакті трьох фаз і називається *законом Юнга*:

$$\sigma_{2-3} = \sigma_{1-3} + \sigma_{1-2} \cos \theta. \quad (1.19)$$

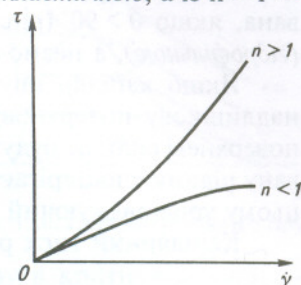


Рис. 1.7. Графіки реологічної моделі Оствальда

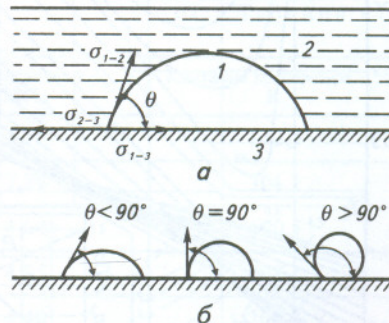


Рис. 1.8. Рівновага краплі рідини на твердій поверхні:
1—крапля; 2—навколишнє середовище; 3—тверде тіло

Кут θ між поверхнею твердого тіла і дотичною до краплі з вершиною на лінії розділу трьох фаз називається *крайовим кутом змочування* і є мірою змочування твердого тіла рідиною. Поверхня, змочувана рідиною, якщо $\theta < 90^\circ$; має нейтральну змочуваність, якщо $\theta = 90^\circ$, і незмочувана, якщо $\theta > 90^\circ$ (рис. 1.8,б). Змочувана рідиною (водою) поверхня називається *ліофільною* (*гідрофільною*), а незмочувана — *ліофобною* (*гідрофобною*).

Якщо капіляр опустити в рідину, яка його змочує, то рідина, намагаючись зменшити надлишкову поверхневу енергію, почне самовільно рухатись по капіляру вгору доти, поки поверхневі сили не будуть врівноважені вагою стовпа рідини. При опусканні капіляра у незмочувану рідину спостерігається протилежне явище — рідина в капілярі опускається вниз. При цьому урівноважуючий гідростатичний тиск стовпа рідини називають *капілярним тиском*.

Капілярний тиск p_k визначається в залежності від радіуса r капіляра:

$$p_k = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (1.20)$$

і направлений у бік незмочуваної фази. В залежності від характеру змочуваності породи капілярний тиск може сприяти або перешкоджати витисненню нафти із породи.

Теплофізичні властивості нафти: питома теплоємність $c = 1884 \dots 2763$ Дж/(кг·К); коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,01 \dots 1,16$ Вт/(м·К); коефіцієнт температуропровідності $a = (0,12 \dots 0,55) 10^{-4}$ м²/с; коефіцієнт теплового об'ємного розширення $\beta_T = (0,58 \dots 1,27) 10^{-3}$ 1/К. Із підвищенням температури коефіцієнт об'ємного розширення збільшується. Для нафти з більшою густиною коефіцієнт β_T менше.

Нафта належить до діелектриків, тобто непровідників електричного струму.

Фізичні властивості нафти можуть суттєво змінюватися як з глибиною покладу, так і по його площі.

Фізичні властивості **природного газу** залежать від його хімічного складу і умов залягання (тиск, температура).

Зв'язок між густиною газу і його молярною масою μ , тиском p та температурою T визначається рівнянням стану реального газу

$$p = \frac{\mu p}{\bar{z}(p, T) R T}, \quad (1.21)$$

де R — універсальна газова стала ($R = 8,3144$ Дж/(моль·К);

$\bar{z}$ — коефіцієнт надстисливості газу.

Молярна маса природного газу знаходиться як для суміші газів:

$$\mu = \sum_i \mu_i y_i, \quad (1.22)$$

де μ_i — молярна маса i -го компонента газу;

$y_i = n_i / \sum n_i$ — молярна частка i -го компонента газу;

n_i — кількість молів i -го компонента газу в суміші.

Коефіцієнт надстисливості газу $\bar{z}$ визначається з допомогою емпіричних графіків М. Стайдінга і Д. Катца (рис. 1.9) в залежності від приведених тиску $p_{пр}$ і температури $T_{пр}$, тобто відношення значень p та T до відповідних середніх критичних значень тиску p_k і температури T_k суміші газів

$$p_{пр} = p / \sum_i y_i p_{ki}, \quad (1.23)$$

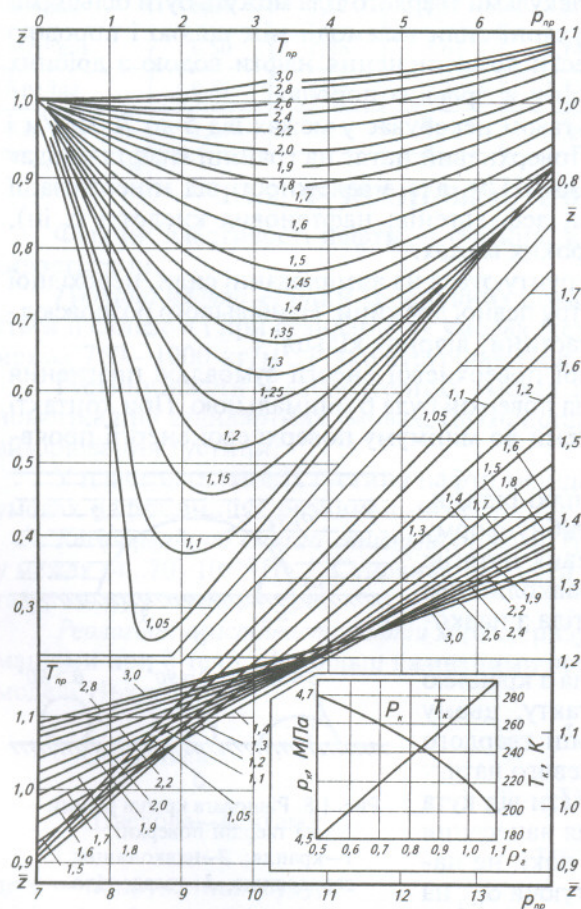


Рис. 1.9. Графіки залежності коефіцієнта надстисливості газу $\bar{z}$ від приведених тиску $p_{пр}$ і температури $T_{пр}$

$$T_{\text{пр}} = T / \sum_i y_i T_{\text{ки}}, \quad (1.24)$$

де $p_{\text{ки}}, T_{\text{ки}}$ — критичні тиск і температура i -го компонента суміші газу.

На рис. 1.10 показані характерні ізотерми $p(V)$ реального газу. При низьких температурах на ізотермах AD і AD' виділяються горизонтальні ділянки, які збігаються в точці K на деякій ізотермі з температурою T_k . Горизонтальні ділянки, обмежені кривою LKC , відповідають умовам, за яких газ перебуває одночасно у рідкому і газоподібному станах. Точка K з найбільшими значеннями температури і тиску, за яких газ може одночасно перебувати у рідкому і газоподібному станах, називається *критичною точкою*. Параметри газу в критичній точці — тиск p_k , молярний об'єм V_k і температура T_k — називаються *параметрами критичного стану* газу.

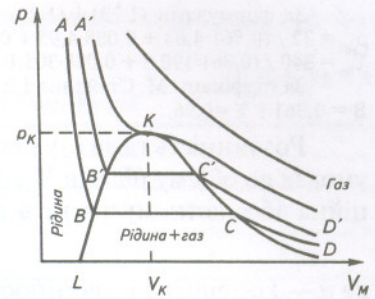


Рис. 1.10. Ізотерми реального газу

В окремих випадках для визначення критичних тиску і температури можна використати графічну залежність (рис. 1.9), де їх знаходять за відносною густиною газу за повітрям ρ_r^* .

Коефіцієнт надстисливості природних газів може бути обчислений з допомогою рівняння стану Редліха—Квонга:

$$\bar{z}^3 - \bar{z}^2 + (A - B^2 - B)\bar{z} - AB = 0, \quad (1.25)$$

де $A = 0,42748 p_{\text{пр}} / T_{\text{пр}}^{2,5}$;

$B = 0,08664 p_{\text{пр}} / T_{\text{пр}}$.

У табл. 1.13 наведені деякі фізичні властивості газів.

Приклад 1.2. Визначимо коефіцієнт надстисливості газу з відносною густиною за повітрям $\rho_r^* = 0,73$ при температурі $T = 340$ К і тиску $p = 32$ МПа.

На рис. 1.9 знаходимо критичні значення температури $T_k = 224$ К і тиску $p_k = 4,66$ МПа. Тоді $p_{\text{пр}} = 32/4,66 = 6,87$ і $T_{\text{пр}} = 340/224 = 1,52$. За графіками М. Стайдінга і Д. Катца маємо $\bar{z} = 0,93$.

Використаємо рівняння Редліха—Квонга (1.25): $A = 1,031$; $B = 0,392$ і $\bar{z} = 0,94$.

Приклад 1.3. Визначимо коефіцієнт надстисливості газу при температурі $T = 340$ К і тиску $p = 32$ МПа. Склад суміші газу (об'ємна концентрація, %) при нормальних умовах: CH_4 — 86,1; C_2H_6 — 8,8; C_3H_8 — 2,8; C_4H_{10} — 1,2 і CO_2 — 1,1.

За табл. 1.13 визначимо критичні значення тиску і температури для кожного компонента суміші (в порядку їх запису):

Тиск, МПа	Температура, К	Молярна частка
$p_{k1} = 4,64$	$T_{k1} = 190,5$	$y_1 = 0,861$
$p_{k2} = 4,95$	$T_{k2} = 305,1$	$y_2 = 0,088$
$p_{k3} = 4,40$	$T_{k3} = 268,6$	$y_3 = 0,028$
$p_{k4} = 3,16$	$T_{k4} = 425,8$	$y_4 = 0,012$
$p_{k5} = 7,39$	$T_{k5} = 304,1$	$y_5 = 0,011$

Оскільки молі газів в однакових умовах займають рівні об'єми, то об'ємна і молярні частки будуть рівними.

Таблиця 1.13

Фізичні властивості газів

Газ	Густина при нормальних умовах, кг/м ³	Відносна густина за повітрям ρ_r^*	Критичний тиск p_k , МПа	Критична температура T_k , К
Повітря	1,292	1,000	3,77	132,3
Вуглекислий газ	1,976	1,529	7,39	304,1
Метан	0,716	0,554	4,64	190,5
Етан	1,356	1,049	4,95	305,1
Пропан	2,019	1,562	4,40	268,6
n-Бутан	2,703	2,091	3,16	425,8
Ізобутан	2,668	2,064	3,36	407,0
Ізопентан	3,221	2,491	3,34	470,2
Сірководень	1,539	1,190	9,00	373,4

За формулами (1.23) і (1.24) обчислимо відповідно:
 $p = 32 / (0,861 \cdot 4,64 + 0,088 \cdot 4,95 + 0,028 \cdot 4,40 + 0,012 \cdot 3,16 + 0,011 \cdot 7,39) = 6,85$ та
 $T_{пр} = 340 / (0,861 \cdot 190,5 + 0,088 \cdot 305,1 + 0,028 \cdot 268,6 + 0,012 \cdot 425,8 + 0,011 \cdot 304,1) = 1,644$.
 За графіками М. Стайдінга і Д. Катца (рис. 1.9) маємо $\bar{z} = 0,95$. З рівняння Редліха—Квонга одержимо: $A = 0,846$; $B = 0,361$ і $\bar{z} = 0,96$.

Розчинність газів c_r у рідині, яка визначається відношенням об'єму газу $V_{го}$ при нормальних умовах до об'єму рідини V_p , при постійній температурі і невеликих змінах тиску прямо пропорційна абсолютному тиску p газу над поверхнею (закон Генрі):

$$c_r = \alpha p, \quad (1.26)$$

де α — коефіцієнт розчинності.

У загальному випадку коефіцієнт розчинності газу може суттєво змінюватися при збільшенні тиску, підвищенні температури та інших факторах, що сприяють процесу розчинення. За таких умов закон Генрі порушується. В табл. 1.14 і 1.15 наведені експериментальні дані В.Д. Шевцова про розчинність газів у воді. Наприклад, з табл. 1.15 випливає, що в 1 л води при температурі 100 °С і тиску 30 МПа розчиняється 3,5 л метану.

Таблиця 1.14

Коефіцієнт розчинності газів (α) у воді при атмосферному тиску за даними В.Д. Шевцова

Газ	$\alpha \cdot 10^5, \text{Па}^{-1}$ при температурі, °С					
	0	20	40	60	80	100
Метан	0,0556	0,0331	0,0237	0,0195	0,0177	0,0170
Етан	0,0987	0,0472	0,0292	0,0218	0,0183	0,0172
Пропан	0,0370	0,0360	—	—	—	—
n-Бутан	0,0315	0,0206	—	—	—	—
Азот	0,0235	0,0154	0,0125	0,0102	0,0096	0,0095
Вуглекислий газ	1,7130	0,8780	0,5300	0,3590	—	0,2600
Сірководень	4,6700	2,5800	1,6600	1,1900	0,9200	0,8100
Повітря	0,0288	0,0187	0,0141	0,0121	0,0112	0,0111

Таблиця 1.15

Розчинність метану (c_r) у воді за даними В.Д. Шевцова

Тиск, МПа	c_r при температурі, °С					
	60	100	150	200	250	300
5	0,9	0,8	1,0	1,2	—	—
10	1,7	1,5	1,9	2,7	3,2	1,5
15	2,2	2,1	2,9	4,4	5,7	7,5
20	2,7	2,7	3,7	5,7	8,2	13,0
25	3,1	3,1	4,2	7,1	10,6	18,4
30	3,4	3,5	4,7	8,1	12,9	23,1
40	4,1	4,2	5,9	10,0	16,6	31,6
50	4,5	4,7	6,7	11,1	19,7	38,1
60	5,0	5,2	7,5	12,4	22,1	43,2
80	—	—	9,0	15,0	26,4	52,4
100	—	—	10,0	16,6	29,5	59,0
110	—	—	10,1	17,2	30,3	61,1

У табл. 1.16—1.18 наведені дані про вплив тиску і температури на розчинність етану, пропану і сірководню у воді.

Таблиця 1.16

Розчинність етану (c_r) у воді за даними Кальберсона і Мак-Кетта

Тиск, МПа	c_r при температурі, °C					
	40	60	80	100	120	140
1,01	0,30	0,21	0,15	0,14	0,15	0,19
2,03	0,57	0,41	0,33	0,30	0,33	0,40
3,04	0,72	0,56	0,46	0,44	0,50	0,57
4,05	0,81	0,68	0,60	0,58	0,65	0,76
7,60	0,97	0,87	0,81	0,86	0,98	1,16
10,13	1,00	0,93	0,92	0,99	1,15	1,38
15,20	1,06	1,01	1,06	1,20	1,39	1,64
20,27	1,13	1,08	1,13	1,31	1,54	1,85
30,40	1,22	1,18	1,24	1,45	1,73	2,13
40,53	1,28	1,25	1,33	1,55	1,90	2,33
60,80	1,37	1,37	1,50	1,75	2,09	2,53

Таблиця 1.17

Розчинність пропану (c_r) у воді за даними Кабаяші і Катца

Тиск, МПа	c_r при температурі, °C					
	40	60	80	100	120	140
1,01	0,21	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09
2,03	0,25	0,24	0,21	0,21	0,22	0,23
3,04	0,25	0,25	0,28	0,28	0,31	0,34
4,05	0,25	0,25	0,28	0,33	0,38	0,42
7,60	0,27	0,27	0,31	0,37	0,46	0,57
10,13	0,27	0,28	0,31	0,38	0,48	0,62
15,20	0,28	0,29	0,32	0,39	0,51	0,68
20,27	0,28	0,29	0,33	0,41	0,53	0,72

Таблиця 1.18

Розчинність сірководню (c_r) у воді за даними Селлека і Сейджа

Тиск, МПа	c_r при температурі, °C				
	37,8	71,1	104,4	137,8	171,0
1,01	15,4	9,57	7,29	5,0	1,75
2,03	31,5	19,3	14,4	11,6	7,5
3,04	—	29,4	21,6	17,8	13,3
4,05	—	39,5	28,7	24,0	19,3
7,60	—	—	53,2	43,7	39,2
10,13	—	—	73,9	59,2	55,1
15,20	—	—	128,9	98,2	91,9
20,27	—	—	223,5	149,3	138,1

Розчинність газів у суспензіях, як правило, зменшується із підвищенням концентрації інших розчинених речовин. За даними Р.Г. Ахмадєєвої, розчинність метану у воді при наявності $NaCl$ зменшується в 2—3 рази. Досліди А.М. Левіна показали, що коефіцієнт розчинності вуглеводневих газів у глинистій суспензії дещо менший, ніж у воді. Це зумовлено меншою кількістю води в суспензії та її адсорбцією глинистими частинками.

За даними Т.П. Сафронової і Т.П. Жузе, коефіцієнт розчинності компонентів природних газів у нафті в залежності від тиску може збільшуватись і зменшуватись. Встановлено, що розчинність газів збільшується із підвищенням вмісту в нафті парафінових вуглеводнів і зменшується при високому вмісті ароматичних вуглеводнів. Відзначається також, що на розчинність газів у нафті природа газів впливає в більшій мірі, ніж склад нафти. З підвищенням температури розчинність вуглеводневих газів у нафті знижується. Коефіцієнт розчинності природних газів у нафті змінюється в широких межах і досягає $(4...5)10^{-5} \text{ Па}^{-1}$.

Кількість розчиненого у нафті газу характеризують *газовмістом нафти* G , під яким розуміють виділений із одиниці об'єму пластової нафти об'єм газу при зниженні тиску і температури до стандартних умов (атмосферний тиск і температура 20°C), тобто

$$G = \frac{V_r}{V_n},$$

де V_r — об'єм виділеного газу в стандартних умовах із об'єму нафти V_n у пластових умовах.

Ступінь насиченості нафти газом характеризують *тиском насичення*, під яким розуміють максимальний тиск, при якому газ починає виділятися із нафти при її ізотермічному розширенні.

В'язкість природних газів у значній мірі залежить від їх тиску і температури. В інженерних розрахунках в'язкість природного газу може бути прийнята рівною в'язкості метану, якщо вміст важких вуглеводнів не перевищує 10%. У табл. 1.19 наведені, за В.Д. Шевцовим, дані про в'язкість метану при різних температурах і тисках.

Таблиця 1.19

В'язкість метану $\eta \cdot 10^5$, Па·с за даними В.Д. Шевцова

Тиск, МПа	Температура, $^\circ\text{C}$		
	0	25	75
0,1	1,028	1,108	1,260
2,0	1,060	1,133	1,290
6,0	1,223	1,260	0,300
10,0	1,422	1,368	1,455
15,0	1,800	—	—
20,0	2,170	1,990	1,810
30,0	2,802	2,509	2,230

Фізичні властивості **пластових вод** суттєво залежать від виду води (вільна, зв'язана), ступеня мінералізації, розчинності газу, умов залягання (тиск і температура) та інших факторів.

Густина пластових вод у залежності від ступеня мінералізації може змінюватись від 1000 кг/м^3 (прісна вода) до 1450 кг/м^3 (при концентрації солей 643 кг/м^3). Наближена залежність густини мінералізованої води від вмісту розчинених мінеральних речовин наведені нижче.

Вміст добавок, кг/м^3	0	27,5	55,4	113,2	175,8	210,8
Густина води, кг/м^3	1000	1020	1040	1080	1120	1150

Фізичні властивості чистої води при атмосферному тиску ($0,102 \text{ МПа}$) і температурі $+5^\circ\text{C}$:
в'язкість $\eta = 0,0015 \text{ Па}\cdot\text{с}$;

коефіцієнт об'ємного стиснення $\beta = 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$;

коефіцієнт теплового розширення $\beta_T = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;

поверхневий натяг $\sigma = 7,84 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$;

швидкість поширення звуку $a_0 = 1425 \text{ м/с}$;

питома теплоємність $c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$;

коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,564 \text{ Дж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{K)}$;

коефіцієнт температуропровідності $a = 1,34 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

В'язкість пластових вод із підвищенням концентрації розчинених солей збільшується. Про характер впливу температури на в'язкість води можна судити з наведених даних:

$T, ^\circ\text{C}$	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$\eta \cdot 10^3, \text{ Па} \cdot \text{с}$	1,50	1,30	1,00	0,81	0,66	0,56	0,48	0,42	0,37

Збільшення тиску призводить до незначного підвищення в'язкості.

Коефіцієнт об'ємного стиснення з підвищенням тиску зменшується, а температури — збільшується. Характер впливу тиску і температури на коефіцієнт теплового розширення аналогічний.