Предмет «Загальна гідрогеологія»

Гр. ГІ-11, ГЗ-11, ГН-11

17.03.2020 р. Лекція

Тема лекції «ДЕЯКІ ФІЗИЧНІ ТА ВОДНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД»

Фізичні та водні властивості гірських порід визначають їх будівельні та фільтраційні можливості. Відомості про них необхідні для вивчення поведінки гірських порід під впливом природних і штучних факторів.

1. Фізичні властивості

З фізичних властивостей гірських порід слід зазначити такі, що визначають відношення їх до води. Це – гранулометричний склад, пористість, теплопровідність.

Гранулометричним або механічним складом гірських порід називається відносний вміст часток порід різної величини, який визначається у відсотках у відношенні до загальної маси породи. Таку характеристику мають пухкі незцементовані породи (глини, суглинки, супіски, піски тощо).

При дослідженні гранулометричного складу порід складові частини їх прийнято поділяти на групи різних розмірів – фракції. Розмір фракції вимірюється в міліметрах (табл. 6.1).

Таблиця 6.1. **Класифікація гранулометричних фракцій**

Назва фракцій	**Діаметр частинок, мм**
Валуни та каміння:	
крупні	800
середні	800-400
дрібні	400-200
Галька та щебінь:	
великі	200-100
	100-60

Назва фракцій	**Діаметр частинок, мм**
крупні середні дрібні	60-40 40-20
Гравій і жорства: крупні середні дрібні	 20-10 10-4 4-2
Піщані частинки: великі крупні середні дрібні дуже дрібні	 2-1 1-0,5 0,5-0,25 0,25-0,1 0,1-0,05
Пилуваті частинки: крупні дрібні	 0,05-0,01 0,01-0,002
Глинисті частинки: крупні дрібні	 < 0,002 < 0,001

Гранулометричний склад порід вивчають за допомогою механічного аналізу. Він полягає в розчленуванні зразка породи на частинки різного діаметра та визначенні відсоткового вмісту цих часток. Крупні фракції, в які входять частинки розміром від 0,1 до 10 мм, визначаються методом ситового аналізу; дрібні фракції з частинками < 0,1 мм виділяються відмучуванням у спокійній воді, так званим седиментаційним аналізом.

Результати гранулометричного аналізу часто виражають у вигляді графіків, для побудови яких використовуються дані про вміст фракцій за їх сукупністю (табл. 6.2). Для побудови графіку по осі абсцис відкладаються логарифми найбільших діаметрів частин кожної фракцій, а по осі ординат – відсотковий вміст фракцій за їх сукупністю (рис. 6.1).

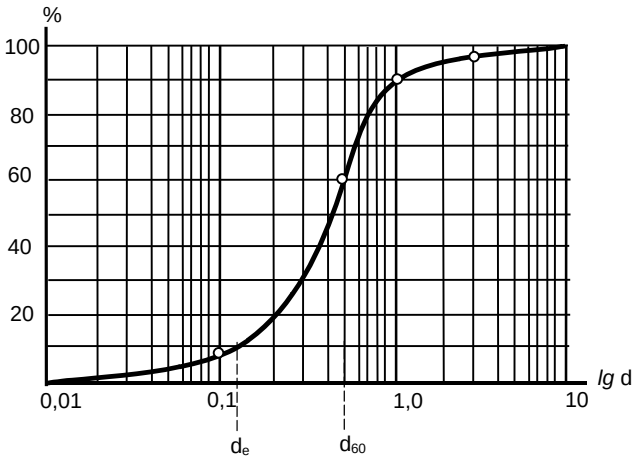

Рис. 6.1 Логарифмічний графік гранулометричного складу

Таблиця 6.2. **Приклад гранулометричного складу**

Вміст фракцій у звичайній формі вираження		**Вміст фракцій за їх сукупністю**	
Діаметр частинок, мм	**Вміст, %**	**Найбільший діаметр частинок у сумі фракцій, мм**	**Сумарний процент**
< 0,01	1,2	0,01	1,2
0,01…0,1	7,3	0,1	8,5
0,1…0,5	48,5	0,5	57,0
0,5…1,0	32,4	1,0	89,4
1,0…3,0	8,2	3,0	97,6
3,0…5,0	2,4	5,0	100,0

За графіком визначають діаметри частинок, що відповідають 10-ти та 60-відсотковому вмісту від суми всіх частинок. Перший з них називається (умовно) *ефективним діаметром* (d_e), менше якого в неоднорідній породі міститься 10 % від суми всіх частинок. Другий (d_{60}) використовується для визначення *коефіцієнту неоднорідності* породи ($K_н$), який розраховується за формулою:

$$K_н = \frac{d_{60}}{d_e} \qquad (6.1)$$

За даними гранулометричного складу гірських порід вивчають їх колекторські властивості, водопроникність, можливість суфозійного виносу дрібних частинок, вибирають раціональну конструкцію фільтра для свердловин тощо.

Для даного прикладу:

$$K_н = \frac{d_{60}}{d_e} = \frac{0.50}{0.12} = 4.2$$

При $K_н < 5$ порода є однорідною, при $K_н > 5$ – неоднорідною.

Крім того, про однорідність порід свідчить також крутий характер кривої неоднорідності. Відносно полога крива відповідає неоднорідним породам.

Пористість – один із важливіших гідрогеологічних показників ємності та проникності гірських порід. Саме у порожнинах гірських порід скупчуються та циркулюють підземні води. Об`єм всіх пустот у гірській породі називають *шпаруватістю*.

Розрізняють шпаруватість капілярну та некапілярну. Для капілярної шпаруватості характерні дрібні пори, в яких вода переміщується під дією меніскових сил. До некапілярної шпаруватості належать крупні пустоти, в яких вода переміщується під дією сил тяжіння та різниці напору.

В осадових рихлих породах виділяють *порову*, а у скельних – *тріщинну* шпаруватість. Дрібні пустоти в гірських породах називаються порами. Розміри пор залежать від дисперсності та генезису порід. Типи пор відображені у табл. 6.3.

Таблиця 6.3.

Типи пор дисперсних порід

Назва пор	**Розмір пор, мм**	**Рух води в порах**	**Гірські породи**
Макропори	>1	Вільний рух	Крупноуламкові,

Назва пор	Розмір пор, мм	Рух води в порах	Гірські породи
		гравітаційної води; капілярне підняття практично відсутнє	біогенні
Мезопори	1-0,01	Рух гравітаційної води відбувається при певному напорі. Капілярне підняття відбувається швидко на невелику висоту	Піщані, лесові, біогенні
Мікропори	10-0,1	Капілярне підняття відбувається повільно на велику висоту. Рух гравітаційної води відсутній	Органо-хімічні та слабко зцементовані, глинисті, біогенні
Ультракапілярні пори	<0,1	Гравітаційне та капілярне переміщення води відсутнє, пори заповнені зв'язаною водою	Глинисті

Величина пористості визначається як відношення об'єму пор до об'єму зразка гірської породи.

Виражається пористість у частках одиниці або у відсотках. Розрізняють три види пористості: загальну, відкриту та активну (рис. 6.2).

Загальна пористість (n) – це відношення всього об`єму пор ($V_П$), які є в породі (включаючи і не сполучені між собою порожнини), до об`єму самої гірської породи ($V_Г$):

$$n = \frac{V_П}{V_Г} \qquad (6.2)$$

Відкрита пористість ($n_в$) – це відношення об`єму відкритих сполучених ($V_{в.с}$) між собою пор до об`єму гірської породи.

$$n_в = \frac{V_{в.с.}}{V_г} \qquad (6.3)$$

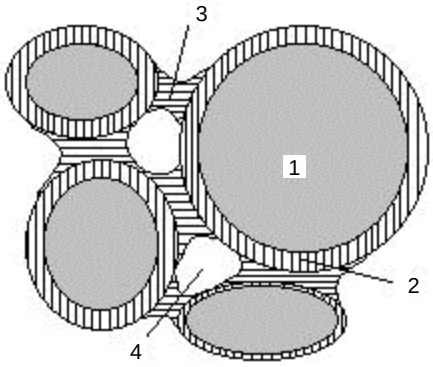

Рис. 6.2. Схема пори: 1 – частинка породи;
2 – об‘єм пори зайнятий фізично-зв‘язаною водою;
3 – об‘єм пори зайнятий капілярною водою; 4 – об‘єм активної пори

При цьому не враховуються закриті та пори дуже малого діаметру (менше 0,0002 мм), які не заповнюються при насиченні породи водою. Для зернистих незцементованих порід відкрита пористість дорівнює загальній, для зцементованих – відкрита пористість набагато менша за загальну.

Активна пористість (n_a) – це відношення до всього об`єму гірської породи тієї частини об`єму пор (V_a), по яких може переміщуватися вільна вода.

$$n_a = \frac{V_a}{V_г} \qquad (6.4)$$

У цьому об`ємі пор не враховується той об`єм, який зайнятий капілярною та фізично зв`язаною водою (див. рис. 6.2).

Таким чином, принципова різниця між всіма видами пористості полягає в тому, що загальна пористість більша за відкриту, а та – більша за активну.

Величина пористості гірських порід залежить від розташування, форми та розмірів їх частинок. Якщо частинки однакові і правильної кулястої форми, то при їх кубічному розташуванні вони мають найменш щільне упакування, при тетраедральному – найбільш щільне, при ромбоїдальному – середньої

щільності (рис. 6.3). В першому випадку (*а*) пористість породи буде дорівнювати 0,476*d, у другому – 0,262*d (d – діаметр частинок).

Часто невеликі частинки заповнюють проміжки між частинками більшого діаметра, в результаті утворюється середовище з неоднорідним гранулометричним складом. Такі породи характеризується меншою пористістю порівняно з добре відсортованими. Однак залежність між розмірами частинок та пористістю непроста. Мілкі глинисті частинки пластинчатого, неправильного і кутастого виду обумовлюють більший об'єм пор порівняно з більш крупними округлими частинками пісків. Пори у глинах мають вигляд подовжених щілиноподібних проміжків. Тому пористість глинистих порід сягає 0,4-0,5 і більше порівняно з пісками, де вона становить всього 0,3-0,4. Але незважаючи на меншу пористість, у пісків добра проникність і вони утворюють водоносні горизонти, а глини служать водотривами, або пропускають невелику кількість води. Це пояснюється тим, що при великій загальній пористості у глин розміри окремих пор малі і зайняті фізично зв'язаною та капілярною водою, які не переміщуються під дією гравітації та напірного градієнту.

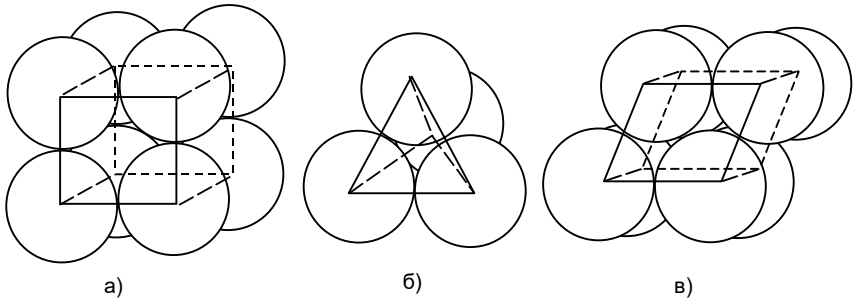

Рис. 6.3. Схема розташування частинок гірської породи: а – кубічне, б – тетраедральне, в – ромбоїдальне

Слід зазначити деякі особливості пористості глинистих порід. Вони мають властивість змінювати свій об'єм залежно від ступеня вологості. При збільшенні вологості глина розбухає, тобто збільшує свій об'єм, а при втраті вологи – стискується. Тому пористість глин виражають коефіцієнтом пористості ($e_г$), який виражається відношенням об'єму пор ($V_П$) до об'єму

твердої частини (V_c) зразка (об'єму скелета ґрунту), а не до об'єму всього зразка породи, який, як уже зазначалося, змінюється:

$$e_в = \frac{V_п}{V_c} \qquad (6.5)$$

Пористість характерна не тільки для дисперсних порід, але і для скельних. Серед скельних найбільшою загальною пористістю володіють деякі ефузивні породи: трахіт, пемза, вулканічний туф (0,5-0,6). Карбонатні породи залежно від характеру їх цементації мають пористість від 0,05 до 0,3. Найменшою пористістю (0,01-0,03) характеризуються не тріщинуваті інтрузивні та магматичні породи.

Зазначимо, що пори у скельних породах закриті (міхуркові не сполучні між собою). Вони не мають значення в обводненності порід. Обводненність і водопроникність скельних порід обумовлена їх тріщинуватістю. Багато порід із кристалічними структурними зв'язками (особливо магматичні та метаморфічні) при пористості 0,01-0,05 можуть мати тріщинну порожнистість, що досягає 0,1-0,2. За шириною тріщини поділяються на тонкі (<1 мм), мілкі (1-5 мм), середні (5-20 мм), крупні (20-100 мм) і дуже крупні (>100 мм).

Пористість і тріщинуватість – важлива характеристика під час гідрогеологічної оцінки гірських порід як колекторів підземних вод.

Теплопровідність – це властивість гірських порід передавати теплову енергію. Завдяки цій властивості між по-різному нагрітими ділянками та шарами гірських порід у надрах Землі відбувається теплообмін.

Теплопровідність має атомно-молекулярний характер і складається з електронної та фононної складових. Електронна теплопровідність визначається передачею енергії вільних електронів (рудні мінерали), фононна ж здійснюється шляхом пружних коливань часток (фононів) кристалічної гратки, вона характерна для всіх гірських порід.

У твердих тілах тепло розповсюджується за законом Фур`є:

$$q = \lambda \cdot gradt\ , \qquad (6.6)$$

де q – щільність теплового потоку; λ – коефіцієнт теплопровідності, який залежить від природи та стану середовища, в якому розповсюджується тепло; *grad t* – градієнт температури в напрямку розповсюдження тепла.

Мірою теплопровідності гірських порід часто служить коефіцієнт теплопровідності (λ), який характеризується кількістю тепла, що проходить в одиницю часу через одиницю площі і шар одиничної потужності при перепаді температури на його поверхні в 1^0С. Розмірність коефіцієнта теплопровідності – Вт/(м*К).

Теплопровідність гірських порід залежить від щільності порід, розмірів пор, гранулометричного складу, температури та їх вологості. Найменш теплопровідні: вугілля – 0,3 Вт/(м*К), пісок – 1,7; висока теплопровідність, наприклад, у залізної руди – 3,1, кварцитів – 5,2; теплопровідність води – 0,57 Вт/(м*К).

За особливостями температурного режиму в земній корі виділяють зовнішню зону, пояс постійних річних температур і внутрішню геотермальну зону.

Зовнішня геотермальна зона (геліотермозона) розташована у верхній частині земної кори. Основним джерелом теплової енергії тут є сонце. У межах цієї зони виділяються пласти добових, сезонних і річних коливань температури. *Добові* коливання затухають на глибині 1-2 м від поверхні землі; *сезонні* коливання пов`язані із сезонами року і розповсюджуються до глибини 8-10 м; *річні* коливання простежуються значно глибше – до 15-30 м.

Пояс постійних температур залягає на деякій глибині, де температура гірських порід мало змінюється протягом року. Оскільки амплітуда річних коливань температури в зовнішній геотермальній зоні затухає з глибиною, на деякій глибині її значення наближається до 0^0С Глибина залягання поясу

постійних температур коливається в межах 10-25 м (Единбург – 11,9, Париж – 14,6, Київ – 15,0, Брюссель – 15,8 м). Температура цього поясу залежить від кліматичних умов території. Так, на Таймирському півострові вона становить 13^0 С, а у Середній Азії – $+20^0$ С.

Внутрішня геотермальна зона (геотермозона) розташована глибше поясу постійних температур. Джерелом теплової енергії в цій зоні є внутрішнє тепло Землі, тому температура гірських порід тут збільшується з глибиною. Інтенсивність зростання температури з глибиною характеризується величиною геотермічного градієнта. *Геотермічним градієнтом* називається величина підвищення температури у градусах із заглибленням на 100 м. У Карпатах ця величина дорівнює 2-3^0С/100 м, у Криму – 3-5^0/100 м, на Українському щиті – 0,6-0,9^0/100 м. Інтервал глибин, у межах якого температура гірських порід збільшується на 1^0 С, називається *геотермічним ступенем*. За середній геотермічний ступінь приймають 33 м/1^0 С. У дійсності величина геотермічного ступеня змінюється в широких межах – від 1 до 200 м/1^0 С. Так, у Криму вона коливається від 20 до 33,3 м/1^0 С, на Українському щиті – 111-160 м/1^0 С.

Тепловий режим земної кори, який обумовлений сонячною радіацією та теплом, що надходить із глибин Землі, визначає температуру підземних вод. Рідка вода в областях багаторічної мерзлоти може мати температуру до -5^0 С, в областях молодої вулканічної діяльності зустрічаються високотермальні та перегріті води (> 100^0С).

Температура гірських порід значною мірою впливає на процеси формування хімічного складу та мінералізації підземних вод, визначає їх фізичні та хімічні властивості. Температура гірських порід є основним фактором формування термальних підземних вод.

2. Водні властивості гірських порід

Водні властивості гірських порід проявляються у взаємодії гірських порід із водою. До основних водних властивостей гірських порід належать: вологість, вологоємність, водовіддача, водопровідність, капілярність.

Вологість характеризує ступінь насиченості гірських порід водою. У породах, що залягають вище рівня ґрунтових вод, вміст води протягом року змінюється залежно від сезонних змін температури, тиску та вологості повітря, випаровування, атмосферних опадів тощо. Нижче дзеркала ґрунтових вод гірські породи насичені повністю і тому вологість їх практично залишається постійною і є максимально можливою для даних порід відповідно до їх пористості.

Кількісно *вологість гірських порід* (W) виражається відношенням маси води, що міститься у порах і тріщинах порід ($q_в$), до маси абсолютно сухої породи (q_c); визначається у відсотках або частках одиниці.

$$W = \frac{q_в}{q_c} \qquad (6.7)$$

Вміст води в гірських породах у природних умовах характеризує її *природну вологість ($W_{пр}$)*.

Вологоємність – це властивість гірських порід вміщувати та утримувати в собі деяку кількість води. Так само, як і вологість, вологоємність визначається відношенням маси води до маси сухої породи у відсотках і частках одиниці.

За ступенем вологоємності виділяють три групи порід: 1) вологоємні – торф, глина, суглинок тощо; 2) слабо вологоємні – глинистий пісок, лес, мергель тощо; 3) не вологоємні – пісок, гравій, галечник тощо.

Не вологоємні породи можуть містити в собі воду, але не утримують і при відповідних умовах віддають її під дією сили тяжіння. Відносно не вологоємних порід застосовується термін "водоємні".

Залежно від видів води, які містяться в гірських породах, розрізняють: повну, капілярну, молекулярну та гігроскопічну вологоємності.

Повна вологоємність (W_n) відповідає максимальній кількості води, яка міститься в породі при повному насиченні її водою.

Капілярна вологоємність (W_k) виражається максимальною кількістю води, яка утримується тільки в капілярних порах породи. У глинистих породах пори переважно капілярні, і тому капілярна вологоємність у них близька до повної.

Гігроскопічна вологоємність ($W_г$) – це властивість часток гірської породи притягувати з повітря пароподібну воду. Розрізняють два види гігроскопічності: неповну та максимальну. Під *неповною гігроскопічністю* розуміють ту кількість водяної пари, яка поглинається породою з повітря при даній його вологості. *Максимальною гігроскопічністю* називається максимальна кількість пароподібної води, яку може поглинати порода з повітря при повному насиченні його водяною парою.

Максимальна гігроскопічність для тієї чи іншої породи є величиною постійною. Звичайно чим більше сумарна поверхня частинок породи, тим більше її гігроскопічність.

Молекулярна вологоємність ($W_м$) – відповідає кількості фізично зв'язаної води, яка утримується на поверхні частинок породи електромолекулярними силами. Максимальна кількість води, що може утримувати в собі порода, відповідає величині *максимальної молекулярної вологоємності* даної породи ($W_{ммв}$).

Водовіддача – це властивість водонасичених гірських порід віддавати воду шляхом вільного стікання під дією сили тяжіння. Іншими словами, водовіддача характеризує ємнісні властивості гірських порід. Для кількісної характеристики водовіддачі використовується *коефіцієнт вільної водовіддачі* (μ), який дорівнює відношенню об`єму води, що вільно витікає з породи ($V_B$), до об`єму самої гірської породи ($V_Г$). Визначається в частках одиниці:

$$\mu = \frac{V_B}{V_Г} \qquad (6.8)$$

Балансова структура коефіцієнта вільної водовіддачі виражається залежністю:

$$\mu = W_n - W_k - W_{ммв} - W_{пов}, \qquad (6.9)$$

де W_n – вологість породи при повному насиченні її водою; W_k – капілярна; $W_{ммв}$ – максимальна молекулярна вологоємність; $W_{пов}$ – відносна місткість у порах защемленого повітря.

В табл. 6.4 наведені середні значення коефіцієнта водовіддачі деяких видів гірських порід.

Ємнісні властивості ненасичених гірських порід визначаються *коефіцієнтом нестачі насиченості* ($\mu_н$). Кількісно він дорівнює відношенню об'єму води, що іде на насичення гірської породи ($V_{НВ}$), до об'єму цієї породи:

$$\mu_н = \frac{V_{НВ}}{V_Г} \qquad (6.10)$$

У природних умовах величина коефіцієнта нестачі насичення ($\mu_н$) більше коефіцієнта вільної водовіддачі (μ), оскільки в порах ненасичених порід міститься менше плівкової та капілярної води, ніж у насичених.

Таблиця 6.4. **Значення коефіцієнта водовіддачі**

Назва породи	**Водовіддача, ч. од.**
Піски:	
гравелисті та крупнозернисті	0,25-0,35
середньозернисті	0,20-0,25
дрібнозернисті	0,15-0,20
тонкозернисті та супіски	0,10-0,15

Назва породи	**Водовіддача, ч. од.**
Суглинки	< 0,1
Торф	0,05-0,015
Піщаники, зцементовані глинистим цементом	0,02-0,03
Вапняки тріщинуваті	0,008-0,10

*Капілярність***.** Під капілярними властивостями гірських порід розуміють висоту та швидкість підйому води в капілярних порах. Дрібні пори в породах мають властивості капілярних трубок, в яких діють меніскові сили. Ці сили перевищують сили тяжіння, тому вода спроможна підніматися в порах на ту чи іншу висоту.

За законом Жюрена висота капілярного підняття тим більша, чим більше поверхневий натяг води і чим менший радіус капіляра та менша густина води:

$$h_к = \frac{2a^2}{r \cdot \gamma \cdot g}, \qquad (6.11)$$

де a – капілярна постійна; r – радіус капіляра; γ – густина води; g – прискорення сили тяжіння.

Для приблизних розрахунків справедлива залежність:

$$h_к = 0{,}15 / r \qquad (6.12)$$

Як бачимо, висота капілярного підняття обернено пропорційна радіусу капіляра. Радіус пор у рихлих незцементованих породах залежить як від величини часток, так і ступеня упаковки часток, а пори мають дуже складну форму, тому висоту капілярного підняття в гірських породах визначають дослідним шляхом. Висота капілярного підняття $h_к$ для деяких різностей порід наведено в табл. 6.5.

Таблиця 6.5.Висота капілярного підняття дисперсних порід

Назва породи	**Висота капілярного підняття, см**
Середньозернистий пісок	15-35
Дрібнозернистий пісок	35-100
Супісок	100-150
Суглинок дрібний	150-200
Суглинок середній	200-300
Суглинок важкий	300-400
Глина	400-500

На капілярне підняття впливають температура води, концентрація та хімічний склад води. З підвищенням температури знижується поверхневий натяг, отже зменшується і висота капілярного підняття. При збільшенні концентрації солей зростає поверхневий натяг, тому мінералізована вода піднімається вище, ніж прісна. Розчин NaCl піднімається вище розчину Na_2SO_4 тієї ж концентрації.

Час капілярного підняття до граничної висоти для різних порід неоднаковий. У крупнозернистих пісках з діаметром зерен 2 мм цей час становить 80 діб, а у глинах – від 350 до 475 діб.

Капілярні явища мають велике значення при рішенні як гідрогеологічних завдань (меліорація земель), так і інженерно-геологічних (розрахунки міцнісних властивостей гірських порід в основі інженерних споруд).

Водопроникність – це здатність гірської породи пропускати через себе воду під дією напору. Величина водопроникності залежить від розмірів пор і тріщин гірських порід. Чим вони крупніші, тим легше вода проникає через них.

За ступенем водопроникності всі гірські породи поділяються на три групи: 1) водопроникні – галька, гравій, добре відсортований пісок, закарстовані та тріщинуваті породи з відкритими тріщинами; 2) напівпроникні – глинисті піски, торф, лесоподібні породи, скельні та напівскельні, тріщинуваті та закарстовані породи, порожнини та тріщини яких заповнені дрібнозернистими та глинистими відкладами; 3) практично непроникні, або водотривкі – безтріщинні масивно кристалічні породи та глини.

Кількісно водопроникність порід характеризується *коефіцієнтом фільтрації* (k), який дорівнює швидкості руху води в породі при напірному градієнті, що дорівнює одиниці.

Специфічними водними властивостями характеризуються глинисті породи. Важливішими з них є пластичність, набухання, розмокання, усадка та просадка.

Пластичність – це такий стан глинистої породи, насиченою водою, при якому вона здатна змінювати свою форму.

Набухання – це збільшення об`єму гірської породи (у %) при вбиранні нею води відносно початкового об`єму. Це обумовлене розширенням макропор.

Розмокання – це різновид набухання, при якому об`єм породи не збільшується; порода розпадається на складові елементи, перетворюючись у безформну масу.

Усадка – це зменшення об`єму породи при її висиханні.

Просадка – це зменшення об`єму чи висоти зразка породи при замочуванні його водою під впливом власної маси (леси, лесові породи).

Питання для самоконтролю:

1. Як визначається коефіцієнт неоднорідності пухких гірських порід за їх гранулометричним складом?
2. Чим відрізняється активна пористість гірських порід від відкритої?
3. Завдяки яким джерелам та які термальні зони утворюються в земній корі?
4. Що таке максимально молекулярна вологоємність гірських порід і чим вона відрізняється від їх природної вологості?
5. Що спільного і чим відрізняються між собою коефіцієнт вільної водовіддачі та коефіцієнт нестачі насичення?