ПОСІБНИК
З ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З КУРСУ
«ПЕТРОФІЗИКА»

для студентів 3 курсу спеціальності 6.040103 – «Геологія»
(спеціалізація – геофізика)
ННІ «Інститут геології»

Київ - 2015

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ПОСІБНИК
З ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З КУРСУ
«ПЕТРОФІЗИКА»

для студентів 3 курсу спеціальності 6.040103 – «Геологія»
(спеціалізація – геофізика)
ННІ «Інститут геології»

Затверджено вченою радою
ННІ «Інститут геології»
«28» жовтня 2015 року

Київ - 2015

Посібник з лабораторного практикуму з курсу «Петрофізика» для студентів спеціальності 6.040103 – «Геологія» (спеціалізація – геофізика) ННІ «Інститут геології» / Упорядник – доц., с.н.с. Безродна І.М. – електронний ресурс, 2015 – 58 с.

Рецензент - проф., докт. геол. н. Курганський В.М.

Перелік лабораторних робіт з курсу «Петрофізика»:

Вступ 5
1. Технологія досліджень при вивченні петрофіфізичних властивостей осадових порід. Підготовка зразків до вимірювання фізичних властивостей. 9
2. Визначення об'ємної густини порід 10
3. Визначення коефіцієнту відкритої пористості газоволюметричним методом та методом насичення 17
4. Визначення абсолютної газової проникності методом лінійної фільтрації 22
5. Визначення коефіцієнту залишкової водонасиченості 26
6. Визначення питомого електричного опору 29
7. Дослідження швидкостей пружних хвиль гірських порід 34
8. Вивчення анізотропії магнітної сприйнятливості зразків гірських порід (АМС) на капамістку KLY-2. 42
9. Обробка результатів комплексних петрофізичних досліджень зразків 50
10. Комплексна статистична обробка та інтерпретація даних петрофізики . 53
ЛІТЕРАТУРА 58

Вступ

Дослідження фізичних властивостей в геології і геофізиці, яке проводиться для вивчення гірських порід і руд, є специфічними та характеризуються своїми задачами, теорією, методиками. Це галузь знань виділена в свою науку – петрофізику.

Петрофізика є стиковою областю знань, яка тісно пов'язана з такими науками як фізика речовини, геологія (петрологія, літологія, гідрогеологія, інженерна геологія та інш.) і геофізика (глибинна, регіональна, розвідувальна тощо).

Петрофізика є областю досліджень фізичних властивостей гірських порід і руд із метою вивчення історії геологічного розвитку земної кори, геологічної будови окремих регіонів, пошуків і розвідки корисних копалин. Детальна петрофізична характеристика геологічних утворень, крім того, формує основу інтерпретації геофізичних полів і обумовлює більш інформативне рішення різноманітних задач.

Петрофізика вивчає:

- фізичні і фізико-хімічні процеси, під час яких проявляються фізичні властивості гірських порід (пористість, густина, електропровідність, пружність тощо);
- петрофізичні величини, які характеризують участь гірських порід в геологічних і фізико-хімічних процесах (коефіцієнти пористості, проникності, питомий електричний опір, швидкості поширення пружних хвиль тощо);
- класифікацію петрофізичних величин за їх значеннями, а також гірських порід за петрофізичними та іншими величинами;
- зв'язки петрофізичних величин між собою і з іншими величинами, їх класифікацію;
- локальні і регіональні зміни петрофізичних величин, що пов'язані з особливостями складу і будови геологічних тіл і регіонів, геологічними і фізико-хімічними процесами.

Безпосереднє використання петрофізичних методів при геологічній зйомці середніх і крупних масштабів дозволяє більш об'єктивно розділяти інтрузивні породи на комплекси і фації, метаморфічні й осадові породи - на серії і свити; проводити кореляцію одновікових утворень, а також виділяти перспективні ділянки для пошуків рудних родовищ, зони неоднорідностей, шари з підвищеними колекторськими властивостями тощо. Саме це обумовило існуючі в багатьох країнах світу (Фінляндія, Канада, Австралія тощо) рекомендації щодо обов'язкового проведення петрофізичних зйомок при виконанні регіональних геохімічних та геодинамічних досліджень.

Основними задачами петрофізики є:

- вивчення і систематизація фізичних властивостей порід та мінералів, вивчення зв'язків між фізичними властивостями, складом і структурно-текстурними особливостями порід;
- оцінка впливу на фізичні властивості різноманітних геологічних, фізико-хімічних та термодинамічних чинників;
- оцінка впливу фізичних властивостей на перебіг геологічних процесів;
- використання даних щодо фізичних властивостей порід і їх зв'язків із складом та структурними особливостями як для інтерпретації геофізичних даних, так і для побудови математичних та речовинно-фізичних моделей геологічних об'єктів і процесів.

Такий широкий перелік вирішуваних задач визначається залежністю фізичних властивостей від атомної будови речовин (будова і маса ядер, будова електронних оболонок), типу хімічного зв'язку, зміни складу середовища і термодинамічних умов утворення мінералів і порід. Як наслідок, дуже часто встановлюється високий рівень кореляції між фізичними властивостями і хімічним складом мінералів і гірських порід. Оскільки ж властиві даній породі (мінералу) величини фізичних параметрів формуються під час її утворення і можуть змінюватись в майбутньому, при зміні характеристик середовища. у багатьох випадках є можливим за фізичною характеристикою геологічних формацій відновити термодинамічний режим їх утворення. Водночас, фізичні властивості гірських порід у значній мірі визначають хід геологічних процесів - магматичних, метаморфічних, рудоутворення тощо.

Комплекс досліджень, які проводяться при вивченні петрофізичних характеристик, включає в себе в залежності від задач, що ставляться, зазвичай наступні види робіт:

1. Відбір колекції зразків гірських порід (свердловинні та польові матеріали).
2. Вивчення результатів петрографічних і мінералогічних досліджень зразків.
3. Підготовка зразків до вимірювань в залежності від поставлених задач досліджень:
    - виготовлення зразків певної форми (циліндри, куби, пластини, стрижені, куборомбододекаедри тощо);
    - екстрагування (певними видами розчинників в залежності від поставлених задач),
    - висушування,

- насичення моделями пластових вод або води.

4. Лабораторні дослідження фізичних властивостей в атмосферних умовах.
5. Лабораторні дослідження фізичних властивостей в умовах високого тиску та температури (при необхідності).
6. Статистична обробка результатів досліджень.
7. Аналіз петрофізичних параметрів на основі апріорної геологічної інформації.
8. Побудова петрофізичних залежностей.
9. Побудова петрофізичних карт, розрізів на основі петрофізичної класифікації.

Досліджувані фізичні властивості гірських порід і мінералів (загалом нині вивчається майже 200 петрофізичних параметрів) можуть бути розділені на наступні основні групи:

1) група густинних властивостей об'єднує більше десяти параметрів, найбільш уживаними з яких є мінеральна густина (δ), об'ємна густина (σ_o), густина твердої фази (σ_T), густина газо- і водонасичених порід ($\sigma_{ГН}$ і $\sigma_{ВН}$), структурна рихлість (ω) та кристалохімічна густина (η);

2) група фільтраційно-ємнісних властивостей, до якої включається понад 30 параметрів, серед яких: коефіцієнти загальної ($К_{ПЗ}$), відкритої ($К_{ПВ}$), ефективної ($К_{ЕФ}$) і динамічної ($К_Д$) пористості, коефіцієнти водо-, нафто- і газонасиченості ($К_{ВН,}$ $К_{НН,}$ $К_{ГН}$), коефіцієнт залишкової водонасиченості ($К_{ЗВ}$), коефіцієнт проникності ($К_{пр}$), параметри, що характеризують структуру пустотного тощо;

3) група теплофізичних властивостей, у складі якої вивчають: масову ($С_М$) та об'ємну теплоємність ($С_V$), температуропровідність (а) і теплопровідність (λ) тощо;

4) група пружних властивостей, найуживанішими з яких є: швидкості поширення поздовжніх (V_P) і поперечних (V_S) хвиль, коефіцієнт поглинання енергії пружних коливань (α_E), модуль Юнга (Е), модуль зсуву (G), коефіцієнт Пуассона (ν), модуль об'ємного розширення (К), тензори пружних постійних порід тощо;

5) група електричних властивостей, з яких найбільше значення мають: питомий електричний опір (ρ) і електрична провідність (γ), діелектрична проникність (ε), тангенс кута діелектричних втрат (tgδ), природна (Ада, Аф, Аов) і викликана поляризація (Ав), поляризуємість (η), коефіцієнти електрохімічної активності (α) та поглинання електромагнітної енергії ($К_{ПОГ}$) тощо;

6) група магнітних властивостей. Із параметрів, що до неї належать, найчастіше використовуються: магнітна проникність (μ) і магнітна сприйнятливість (æ), намагніченість - об'ємна (J), індуктивна (J_i), насичення

(J_s), природна залишкова (J_n), термозалишкова (J_{rt}), орієнтаційна залишкова (J_{ro}), в'язка залишкова (J_{rv}), хімічна залишкова (J_{rc}), динамічна залишкова (J_{rd}), п'єзозалишкова (J_{rp}), залишкова насичення (J_{rs}); тензори магнітних параметрів, температура Кюрі (T_c), напруженість магнітного поля насичення (H_s), коерцитивна сила (H_c), коефіцієнт розмагнічування (N) і фактор Кенігсбергера (Q);

7) група радіоактивних властивостей включає, в першу чергу: потужність дози інтегрального гама-випромінювання (J_γ або ЗР), інтенсивність α-, β-, та γ-випромінювання, вміст радіоактивних елементів U(Ra), Th та K^{40}, а також їх дольовий вклад у величину сумарного гама-фону.

Петрофізика гірських порід, що виходять на сучасну поверхню земної кори, є основою для інтерпретації геофізичних даних при пошуках і розвідці рудних і нерудних корисних копалин, глибинних дослідженнях, вивченні геологічної історії Землі. Істотну роль в останньому випадку грає вивчення фізичних властивостей мінералів і гірських порід при високих тисках і температурах, що є причиною реконструктивних або деструктурних петрофізичних змін.

Важливе місце в комплексній інтерпретації петрофізичних даних займає фізико-геологічна модель – узагальнене представлення про основні геологічні і фізичні характеристики досліджує мого геологічного об'єкта.

Лабораторна робота № 1

1. Технологія досліджень при вивченні петрофізичних властивостей осадових порід. Підготовка зразків до вимірювання фізичних властивостей.

Етапи петрофізичних досліджень осадових порід при вивченні колекторських властивостей:

1. Вимірювання геометричних параметрів зразка.
2. Вивчення петрофізичних параметрів в атмосферних умовах.
3. Екстрагування зразка в розчині хлороформу для виведення бітумних компонентів та в спиртобензольній суміші – для виведення мінеральних солей. Сушка зразка при 105°С. Вивчення петрофізичних параметрів
4. Насичення зразка гасом. Вивчення петрофізичних параметрів
5. Екстрагування зразка в розчині хлороформу для виведення гасу (2-ге екстрагування). Сушка зразка при 105°С. Вивчення петрофізичних параметрів
6. Насичення зразка мінералізованою водою (модель пластової води). Вивчення петрофізичних параметрів
7. Визначення параметрів при різній водонасиченості (при різних обертах ротора центрифуги – 1000 об/хв., 2000 об/хв., 3000 об/хв., 4000 об/хв., 5000 об/хв). Вивчення петрофізичних параметрів
8. Екстрагування зразка з метою виведення мінералізованої води (модель пластової рідини) в спиртобензольній суміші. Сушка зразка при 105°С. Вивчення петрофізичних параметрів
9. Насичення зразка мінералізованою водою (модель пластової води). Вивчення петрофізичних параметрів
10. Визначення акустичних і електричних параметрів при високих тисках в інтервалі від 0 до 98 МПа (на установці високого тиску – УВТ

Завдання:

Підготовка зразків до вимірювання фізичних властивостей.

1. З колекції зразків вибрати по 4 зразка порід з представленої колекції.
2. Підготувати їх до вимірювань: підписати номери та грані зразків.
3. Виміряти геометричні розміри зразків.
4. Вивчити петрографічний опис зразків (надається окремо).
5. Оформити результати у вигляді таблиці (табл. 1).

Таблиця 1

Приклад таблиці геометричних розмірів зразків

№ зразка	Назва зразка	Висота зразка	Діаметр	Об’єм зразка (циліндра), $V^{зр}$

Лабораторна робота № 2

2. Визначення об'ємної густини порід

Завдання:

1. Опрацювати теоретичний матеріал щодо визначення густинних властивостей гірських порід, зокрема, методи визначення об'ємної густини.
2. Провести визначення об'ємної густини зразків двома методами: методом гідростатичного зважування та методом розрахованого об'єму (за геометричними параметрами).
3. Порівняти значення густини. Визначити похибку вимірювання
4. Зробити висновки

Теоретична частина

Найбільш точно густинні характеристики зразків визначаються лабораторними методами. При цьому, як правило, застосовується метод гідростатичного зважування.

Для визначення тієї густини породи (σ_O), яку вона мала в природному заляганні, зважуванню піддають свіжозапарафінований зразок.

При зважуванні послідовно одержують:

- масу зразка без парафінової оболонки m_1,
- масу зразка після парафування m_2;
- масу зразка, зануреного у рідину, m_0.

Густину зразка обчислюють за формулою:

$$\sigma_O = \frac{m_1}{(m_1 - m_0)/\sigma_p - (m_2 - m_1)/\sigma_п}, \qquad (2.1)$$

де σ_P - густина рідини,

$\sigma_п$ - густина парафіну.

Похибка визначення густини залежить від

- маси зразка,
- густини зразка,
- густини робочої рідини і парафіну,
- точності зважування.

При дослідженні кристалічних порід похибка, як правило, не повинна перевищувати 1 кг/м^3.

У випадку присутності у складі породи добре розчинних мінералів в якості робочої рідини слід використовувати неелектролітичні рідини, наприклад, гас. При визначенні густини порід, для яких характерна усадка (глини, крейда, деякі мергелі), вводять поправки за усадку. Для зразків масою менше 200 г слід застосовувати терези 2-го класу точності.

Якщо порода є практично непроникною для води, то обходяться без парафування.

Для одержання густини водонасиченого зразка ($\sigma_{вн}$) його попередньо насичують водою, а густину газонасиченої породи ($\sigma_{гн}$) вимірюють після просушування в лабораторній печі. Критерієм водонасиченості зразка (як і видалення вологи зі зразка) є стабілізація його маси. В усьому іншому техніка виміру параметрів густин нафто- і водонасиченого зразка нічим не відрізняється від визначення σ_0.

Для одержання густини водонасиченого зразка $\sigma_{вн}$ можна використовувати метод гідростатичного зважування без парафінування при умові занурення зразка у такий розчин, яким був насичений зразок (з такою ж мінералізацією).

Якщо парафування не провадилося або масою парафіну можна зневажити, а також за умови невисокої точності вимірювань (зважування у воді, густину якої умовно беруть рівною 1000 кг/м^3), використовується спрощений вираз обрахунку густини:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_в \cdot m_1}{(m_1 - m_0)} = \frac{1000 \cdot m_1}{(m_1 - m_0)}, \qquad (2.2)$$

де $\sigma_в$ - густина води, що насищає пустоти.

Густину сипучої неущільненої породи (піску, ґрунту і т.п.) одержують пікнометричним методом, тобто зважуванням визначеного об'єму зразка:

$$\sigma_0 = \frac{(m - m_п)}{V}, \qquad (2.3)$$

де m - маса пікнометра із породою;

$m_п$ - власна маса пікнометра;

V – об'єм породи.

Вимірювати густину порід денситометрами в загальному випадку не рекомендується у зв'язку з низькою точністю вимірювань і внесенням систематичних похибок. Для уникнення таких похибок проводиться перевірка на еталонах декілька (3-4) разів на день.

Для визначення мінеральної густини породу дроблять до часток, що проходять через сито з отвором 0,25 мм^2. Об'єм скелету знаходять шляхом зважування тарованого пікнометра з рідиною і порошком породи, при цьому робочу рідину (гас, спирт, вода) і порошок породи попередньо вакуумують для видалення повітря:

$$\delta м = \frac{(m_1 - m_0) \cdot \sigma_р}{m_3 - m_0 - m_2 + m_1}, \qquad (2.4)$$

де m_0 - маса пікнометра,

m_1 - маса пікнометра з пробою,

m_2 - маса пікнометра з пробою доповненого рідиною,

m_3 - маса пікнометра, наповненого рідиною

Похибка визначення мінеральної густини не повинна перевищувати 10 кг/м^3.

Або мінеральну густину розраховують за формулою:

$$\delta_м = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{mi} \frac{V_{mi}}{V_{тв}}, \qquad (2.5)$$

де σ_{mi}, V_{mi} - густина та об'єм і-го мінералу

Густину природних вод і нафт звичайно вимірюють пікнометричним методом або з застосуванням ареометрів.

Густина осадових порід

Мінеральна густина осадових порід змінюється в достатньо широких межах (табл.2.1). Зазвичай найвищі її значення характерні для нормально-уламкових порід, а мінімальні – для евапоритів і каустобіолітів. Мінливість мінерального складу як алотигенної так і аутигенної складових осадових порід часто обумовлює значні коливання параметру (близько 10-15 %) навіть в межах однорідного геологічного тіла, що, за умови низької пористості, може суттєвим чином впливати на величину σ_O. При зростанні пористості вплив δ_M на об'ємну густину зменшується.

В загальному випадку найвищою є густина твердої фази карбонатних порід ($\sigma_т$ вапняків змінюється переважно від 2710 до 2740 кг/м^3, а доломітів - від 2800 до 2900 кг/м^3). Дещо нижча густина твердої фази піщаних, алевритових і глинистих порід, значення якої можуть знижуватись до 2200 кг/м^3. Водночас, наявність домішок мінералів з високою густиною (гранат, циркон, рутил, ільменіт, каситерит, магнетит, слюди, пірит, сидерит, шамозит тощо) може призвести до значного зростання густини твердої фази порід, яка в окремих випадках може навіть перевищувати 3500 кг/м^3. Зниження $\sigma_т$ в карбонатних та уламкових породах зазвичай пов'язане із присутністю опалу, каолініту, алофану та інших мінералів з малою густиною. Густина твердої фази кременистих порід змінюється від 2000 кг/м^3 (діатоміт) до більш як 2650 кг/м^3 (яшми і кремені). Ще нижчою (в разі відсутності значних кількостей ангідриту) може бути густина твердої фази евапоритів: в мірабіліту вона приблизно дорівнює 1500 кг/м^3, у кам'яної солі - 2100-2200 кг/м^3, у гіпсів – близько 2300 кг/м^3. Найнижчі значення густини твердої фази встановлені для графіту і вугілля ($\sigma_т$=1250-2270 кг/м^3), при цьому низькі значення цього параметру відповідають чистому вугіллю з мінімальною кількістю домішок.

Об'ємна густина осадових порід визначається в першу чергу пористістю, яка обумовлена структурою і діагенезом порід, а в меншій мірі

мінеральним складом.

Об'ємна густина осадових порід змінюється в діапазоні 1200-3000 кг/м^3 і набагато сильніше ніж в інших породах залежить від пористості, а також від густини рідинної та газової фаз. Вплив цих чинників на осадові породи різного генезису відмінний – для уламкових порід визначальну роль відіграють гранулометричний склад, спосіб сполучення зерен і характер цементації, для колоїдогенних – діа- та епігенетичні перетворення тощо. Вплив пустотного заповнювача на величину густини контролюється величиною відкритої пористості.

Діагенетичні і катагенетичні перетворення осадових порід відбуваються під дією зростаючого геостатичного тиску, результатом чого є незворотне компресійне ущільнення. Відтак однотипні осадові утворення одного типу різних рівнів глибинності можуть суттєво відрізнятися за густиною. Найбільшого ущільнення зазнають пластичні глинисті породи, а найменшого – пісковики з жорстким кварцовим і карбонатним цементом.

В молодих глинистих осадках пористість складає 80%. Якщо пористість зменшується на 35-40 %, то густина збільшується до 1800-2080 кг/м^3. При значних навантаженнях і потужності перекриваючої товщі до 3000 м, густина аргілітів може складати 2400-2500 кг/м^3, подальше ущільнення можливе тільки при перекристалізації часток, які спостерігаються в глинистих сланцях.

Найбільші можливостями до ущільнення мають глини. Піски та пісковики, на відміну від глин, більш різко реагують на гравітаційне ущільнення. Добре відсортований пісок на дні водойми може мати пористість 40 %, яка на глибинах 1-1,5 км під дією навантаження вище залягаючих порід зменшується до 6-10% і, відповідно густина збільшується до 2400-2600 кг/м^3, на більших глибинах ущільнення і збільшення густини відбувається більш повільно.

Відмічається, що середня об'ємна густина порід нерідко зменшується к склепінню локальних позитивних структур, де зазвичай зменшується глинистість і збільшується відсортованість і пористість порід.

Перетворення карбонатних осадів в породу та їх ущільнення відбувається також при порівняно невеликих статичних тисках, на глибинах до 1 км густина вапняків і доломітів складає 2500-5600 кг/м^3. Густина карбонатних порід позитивних структур тісно пов'язана з їх положенням в самій структурі. Зазвичай в склепінні структури розвинуті переважно вапняки, а по направленню до крил зростає вміст доломітів, що і веде до збільшення густини. Зменшення густини до склепіння також пов'язано з збільшенням їх тріщинуватості (Кобранова В.Н,, 1986).

Таблиця 2.1 – Мінеральна та об'ємна густина поширених осадових порід (в кг/м^3)

Порода	$\delta_{Мсер}$	$\delta_{M\ min}$ - $\delta_{M\ max}$	σ_{Omin}-σ_{Omax}	σ_O найпоширеніших відмін
Глина	2680	2580-2780	1200-2400	-
Аргіліт	2680	2600-2780	1700-2900	2300-2400
Глинистий сланець	2700	2650-2800	2300-3000	2400-2600
Пісок	2650	2560-2760	1300-2000	1500-1700
Алевроліт	2690	2620-2760	1800-2800	2300-2500
Піщаник	2670	2580-2760	2000-2900	2500-2600
Піщаний сланець	2710	2650-2900	2300-3000	2600-2700
Брекчія*			1600-3000	
Конгломерат*			2100-3000	
Мергель	2700	2580-2800	1500-2800	2200-2400
Вапняк	2720	2620-2800	1800-2900	2600-2700
Доломіт	2800	2760-2950	1900-3000	2600-2800
Крейда	2690	2560-2800	1200-2700	1500-2600
Гіпс	2370	2310-2480	2100-2500	2400-2500
Ангідрит	2960	2920-3000	2400-2900	2500-2600
Сіль кам'яна	2160	2120-2220	2200-2300	
Опока	2450	2200-2500	1000-1600	
Кремінь	2590	2450-2750	2300-2600	
Вугілля		1200-1900	1100-1800	

Зростанню густини сприяють також утворення гематитового, сидеритового, піритового цементу, процеси дегідратації водовмісних мінералів.

Для гідрохімічних осадів діагенез не має сильного впливу, оскільки ці породи вже на стадії осадконакопичення характеризуються мінімальною пористістю. Як висновок при діагенезі порід з глибиною відмічається підвищення густини з збільшенням віку порід.

Загальна закономірність зміни густини водонасичених ($\sigma_{вн}$) однотипних і одновікових порід із глибиною може бути виражена емпіричним рівнянням (М.Л.Озерська):

$$\sigma_{вн}=\delta_M+(1-\delta_M)\cdot К_{Пмакс}\cdot e^{-0,45H}),$$

де Н - глибина залягання порід,

$К_{Пмакс}$ - граничне значення коефіцієнту пористості при Н=0,

δ_M - мінеральна густина.

При інтерпретації петрогустинних даних слід враховувати також залежність густини від умов утворення і існування порід, вплив яких, як правило, найбільш чітко проявляється за рахунок зміни густини мінералів та пористості порід.

Вплив мінералогічного складу на об'ємну густину, як вже вказувалося, не є основним. Але наявність акцесорних мінералів (сидериту, піриту тощо) підвищує густину на 100-200 кг/м^3 . Особливо це характерно для осадових утворень складчастих регіонів та областей сносу в платформному чохлі. Великий вплив на густину має тип цементу. Заміна глинистого цементу в пісковиках та конгломератах на карбонатний збільшує їх густину на 200 кг/м^3. В той же час наявність глинистого цементу в карбонатних породах знижує їх густину.

Таким чином, в осадових породах межі зміни густини в рамках навіть одного літологічного різновиду можуть бути доволі широкі. Наприклад група вапняків може містити 4-5 різновидів від вапняку рихлого з густиною 1800-2250 кг/м^3 до вапняку кристалічного з густиною 2700-2900 кг/м^3, а збагачення породи рудними мінералами призведе до ще одного збільшення густини навіть до 3500 кг/м^3

В результаті, дуже вірогідним є близькі за значеннями величини густинних параметрів в істотно відмінних (за складом, генезисом, структурою) породних відозмінах геологічних об'єктів. З іншого боку, частими є ситуації коли дуже близькі за складом і генезисом породи через другорядні відмінності (в тому числі викликані епігенетичними процесами), можуть істотно відрізнятись за величиною густини.

Знання густинних властивостей є необхідним не тільки для планування і інтерпретації геофізичних досліджень, а й для побудови петрогустинних моделей земної кори, мантії та Землі в цілому, моделювання геологічних процесів, підрахунку запасів корисних копалин тощо.

Апаратура та обладнання

1. Цифрові аналітичні ваги WPS 360/c/2 (точність ±0,001 г)
2. Установка для вимірювання зразків у рідині гідростатичним методом.

Метод гідростатичного зважування

Методика виконання лабораторної роботи враховує нехтування технологією парафінування зразків.

- Зважити зразок 3 рази та отримати середнє значення маси сухого зразка.
- Занурити зразок у воду та зважити його в воді. Визначити масу зразка, зануреного у воду: m_0. Примітка: при збільшенні маси зразка вимірювання проводити в перші секунди занурення (наявність ефекту насичення зразків рідиною).
- Розрахувати об'ємну густину за формулою 2.2.

Метод розрахованого об’єму (за геометричними параметрами)

Методика виконання вимірювань:

- Використати значення маси вимірювання сухого зразка m_1 за попереднім методом.
- Визначити об’ємну густину за формулою:

$$\sigma = \frac{m}{V}. \qquad (2.6)$$

де об’єм *V*, що визначений за геометричними розмірами (табл. 1)

Провести оформлення результатів в таблиці 2.2 та зробити висновки.

Таблиця 2.2

Форма таблиці результатів досліджень об’ємної густини

№ з.п.	№ зразка	Маса зразка, кг		Густина зразка, кг/м^3		
		у повітрі	у воді	За методом гідростатичного зважування	За методом розрахованого об’єму	Приміт ка

Лабораторна робота № 3

3. Визначення коефіцієнту відкритої пористості газоволюметричним методом та методом насичення

Завдання:

1. Опрацювати теоретичний матеріал щодо визначення ємнісних властивостей гірських порід, зокрема, методи визначення відкритої пористості.
2. Дослідити об'єм пустотного простору зразків за допомогою установки для визначення пористості.
3. Розрахувати коефіцієнт відкритої пористості за газоволюметричним методом.
4. Вивчити табличні параметри щодо мас насичених мінералізованою водою зразків.
5. Розрахувати коефіцієнт відкритої пористості за методом насичення.
6. Порівняти отримані дані.
7. Зробити висновки

Пористість і проникність порід

У будь-якому випадку, в більшості випадків вплив загальної пористості мінералів на величину загальної пористості породи не є визначальним.

Навпаки, вважається що значення пористості гірських порід є відображенням виключно структурно-текстурних особливостей породи (табл. 3.1):

- ущільнення і розтягу
- зневоднення порід,
- їх цементація,
- стресу або розтріскування при тектонічних процесах
- часткова перекристалізація,
- вилуговування з них солей і речовини твердої фази, або, навпаки, осадження мінеральних часток із розчинів у пустотах порід
- зміна мінерального і гранулометричного складів порід сприяють як зменшенню, так і збільшенню величини пористості.

Конкретні значення пористості для кожної окремої **осадової породи** визначається багатьма факторами, однак, найбільш значимі з них є:

- глибина залягання породи (температура і тиск зокрема),
- вміст глинистих мінералів,
- інтенсивність вторинних процесів,
- вік порід.

При зануренні осадових порід на великі глибини в процесі формування осадових басейнів повільно зростає вплив на породу тиску і температури.

При цьому зменшується пористість порід.

Таблиця 3.1 – Найбільш імовірні діапазони значень загальної пористості деяких порід

Осадові та метаморфічні породи		Магматогенні породи і руди	
Порода	$К_{ПЗ}$, %	Порода	$К_{ПЗ}$, %
Піщаний мул	30…70	Еклогіт	0,2…1, 5
Пісок	4…50	Серпентиніт	0,8…12
Пісковик	1…40	Габро	0,2…3
Піщаний сланець	1…15	Дуніт, перидотит	0,3…2
Кварцит	0,2…20	Анортозит	0,3…3,0
Алевритовий мул	60…70	Діорит	0,4…3,0
Глина	4…75	Сієніт	0,4…4
Аргіліт	1…30	Граніт	0,3…4
Сланець глинистий	1…25	Сієніт нефеліновий	0,6…4
Гнейс	0,4…2,6	Аляскіт	0,2…4
Діатоміт	30…80	Базальт	0,4…40
Трепел, опока	25…66	Діабаз	0,2…3
Кремінь	1…6	Андезит	0,4…22
Крейда	10…55	Порфірит	0.4…6
Вапняк	0,5…48	Трахіт	1,2…22
Вапняк мармуризований	0,4…6	Кварцовий порфір	0,5…10
Мармур	0,3…2,2	Ліпарит	4.5…36
Доломіт	0,3…37	Обсидіан	1…12
Гіпсова порода	1…37	Туфолава	6…60
Ангідритова порода	0,5…17	Туф вулканічний	3…57
Кам’яна сіль	0,2…5		
Боксит	0,5…55		
Торф	до 95		
Буре вугілля	12…40		
Кам’яне вугілля	3…12		
Антрацит	1…2		

Апаратура та обладнання.

1.Установка для визначення відкритої пористості за газоволюметричним методом.

2. Плексиглазові еталони.

Газоволюметричний метод

За допомогою установки, розробленій в Київському університеті, визначається об'єм пустотного простору породи.

Установка представляє собою замкнену систему, в яку входять: циліндричний кернотримач із обтискувачем, балон з газом (азот), манометр та вентилі для замикання/відкривання лінії.

Хід роботи:

1. Вимірюється висота та діаметр двадцяти еталонних плексигласових зразків різного розміру, знаходять об'єм кожного.

2. Створюють кожен раз в замкненій лінії певний тиск. Розташовують еталони (по черзі) в камері та для кожного еталону вимірюють падіння тиску в лінії при її розімкненні (відкриття вентиля).

3. Розраховують об'єм пустоти ($V_{ПП}$) в камері для кожного еталону.

$$V^{i\ ет}{}_{пп} = V^{20\ ет} - V^{i\ ет}, \qquad (3.1)$$

де $V^{20\ ет}$ - об'єм 20 еталону, який відповідає об'єму камери та заповнює її повністю,

$V^{i\ ет}$ - об'єм *i* – того еталону.

4. Результати вимірювань та розрахунків заносять в таблицю (табл. 3.2)

Таблиця 3.2.

Форма таблиці результатів досліджень еталонів

№ еталона	*l*,см	*d*, см	*V*, см^3	$V^{i\ em}{}_{пп}$, см^3	P_i

Падіння тиску в лінії вважаємо пропорційним об'єму пустотного простору в камері.

5. Будується графік залежності $V^{i\ em}{}_{пп}$ від падіння тиску P_i для еталонів, точки апроксимуються лінійною залежністю (рис. 3.1).

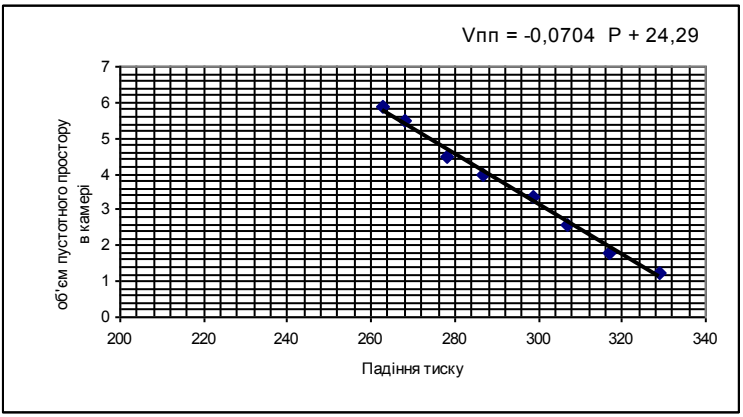

Рис. 3.1. Приклад графіку залежності об'єму пустоти в камері від падіння тиску P_i для виміряних еталонів

6. Проводиться вимірювання падіння тиску (Р) для досліджуваних зразків.

7. Знаходять значення $V^{зр}_{пп}$ за рівнянням залежності $V^{em}_{ПП} = f(P)$ при відомому P_i.

8. Знаходять коефіцієнт відкритої пористості за даними $V^{em}_{ПП}$ *та* $V^{зр}$ (табл. 3.1) за формулою:

$$K_n = \frac{V^{зр}_{пп}}{V_{зр}} \cdot 100 \qquad (3.2)$$

9. Результати оформити в таблиці (табл. 3.3) та зробити висновки.

Таблиця 3.3.

Форма таблиці результатів досліджень коефіцієнту відкритої пористості

№ зразка	P_i	$V_{пп}$, $см^3$	$V_{зр}$, $см^3$	$К_п^{(1)}$, %

Метод насичення

Теоретична частина.

Коефіцієнт відкритої пористості за методом насичення зразків визначається методом гідростатичного зважування насиченого (при вакуумуванні) робочою рідиною зразка:

$$K_n = \frac{m_2 - m_0}{m_0 - m_1} 100, \qquad (3.3)$$

де m_0 - маса сухого зразка,

m_1 - маса зразка зануреного в рідину,

m_2 - маса зразка насиченого робочою рідиною (гас або мінералізована вода), зануреного у рідину.

Завдання:

При вивченні апріорних даних щодо мас насичених мінералізованою водою зразків зробити розрахунки за формулою (3.3), а результати занести в таблицю. Зробити висновки.

Таблиця 3.4.

Результати визначення коефіцієнту відкритої пористості за методом насичення зразків

№ зразка	m_o	m_1	m_2	$К_п^{(3.2)}$, %	$К_п^{(3.3)}$, %

Лабораторна робота № 4
4. Визначення абсолютної газової проникності методом лінійної фільтрації

Завдання:

1. Опрацювати теоретичний матеріал щодо визначення проникності гірських порід..
2. Провести визначення абсолютної газопроникності.
3. Зробити висновки

Теоретична частина

Однією з найважливіших ємнісних властивостей порід є їх проникність, тобто властивість проводити (фільтрувати через себе) рідини, гази і їх суміші за наявності градієнту тиску.

Запишемо лінійний закон фільтрації Дарсі

$$\frac{\Theta}{F} = K_{np} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

де Q кількість сухого газу або однорідної однокомпонентної рідини;

F - перетин пустот

ΔP - градієнт тиску

ΔL –довжина фільтруючого пористого середовища,

μ - динамічна в'язкість речовини, що фільтрується

Згідно цього закону пустоти проводять за одиницю часу тим більшу кількість (Q) сухого газу або однорідної однокомпонентної рідини, чим більший їх перетин (F), градієнт тиску (Δp), ΔL –довжина фільтруючого пористого середовища, μ - динамічна в'язкість речовини, що фільтрується:

Коефіцієнт проникності $К_{пр}$ визначає зміну розходу газу (або однокомпонентної рідини) в різних породах при заданих перетині, градієнті тиску і в'язкості.

Залежність проникності не тільки від властивостей середовища, але й від взаємодії речовин які фільтруються з породами та кількості фаз флюїдів, обумовила необхідність введення понять:

- абсолютної,
- фазової та
- відносної проникності.

Абсолютна проникність ($К_{пр}^{абс}$) визначається при фільтрації єдиної фази, яка фізично і хімічно інертна до породи.

Фазові проникності ($К_{пр}^{фаз}$) визначають при наявності в породі більш за одну фільтруючу фазу (наприклад, нафтова проникність і газова).

Відносна фазова проникність ($К_{пр}^{відн}$) – це відношення фазової проникності до абсолютної:

$(К_{пр}^{відн}) = (К_{пр}^{фаз}) / (К_{пр}^{абс})$.

Визначення абсолютної газопроникності проводять на зразках порід правильної циліндричної форми з діаметром 30 мм, які екстраговані спиртобензолом і висушені до постійної ваги. Розрахунок коефіцієнта абсолютної газопроникності при стаціонарній фільтрації проводять за формулою:

$$K_{пр} = \frac{Q \cdot \mu \cdot 10^3 \cdot P_б \cdot L}{\Delta P(\Delta P / 2 + P_б) \cdot F},$$

де $К_{пр}$ – коефіцієнт газопроникності (мкм^2, мД);

$P_б$ - барометричний тиск (МПа);

μ – в'язкість газу за умов фільтрації (МПа·с);

ΔP – перепад тиску на зразку між входом газу у зразок і виходом (МПа);

L – довжина (висота) зразка (м);

F – площа поперечного перерізу (м^2);

Q - витрати газу (м^3/с), яке визначаються за формулою:

$$Q = \frac{V}{t},$$

де V – об'єм газу, що пройшов через зразок (м^3);

t – час фільтрації газу (с).

Схема **установки** (рис. 4.1) для визначення проникності гірських порід при стаціонарній фільтрації, крім стандартних складових – джерела, регулятора та вимірювача тиску на вході у зразок, а також вимірювача витрат газу включає кернотримач із олео, пневмо- чи гідрообтискувачем та вимірювач тиску на ньому.

Суть процесу визначення проникності полягає у визначенні постійної (стаціонарної) швидкості фільтрації газу через зразок породи у лінійному напрямку під дією постійної різниці тисків. При цьому швидкість фільтрації визначається зафіксованим об'ємом газу, що пройшов через зразок породи за певний відрізок часу.

Таким чином, визначення газопроникності при стаціонарній фільтрації проводиться при лінійному напрямку потоку газу. Зразок поміщається в кернотримач, створюється тиск 1,6 кг·с/см^2 (тиск в балоні 150 атм.). Редуктором регулюється подачу газу таким чином, щоб він ішов через зразок.

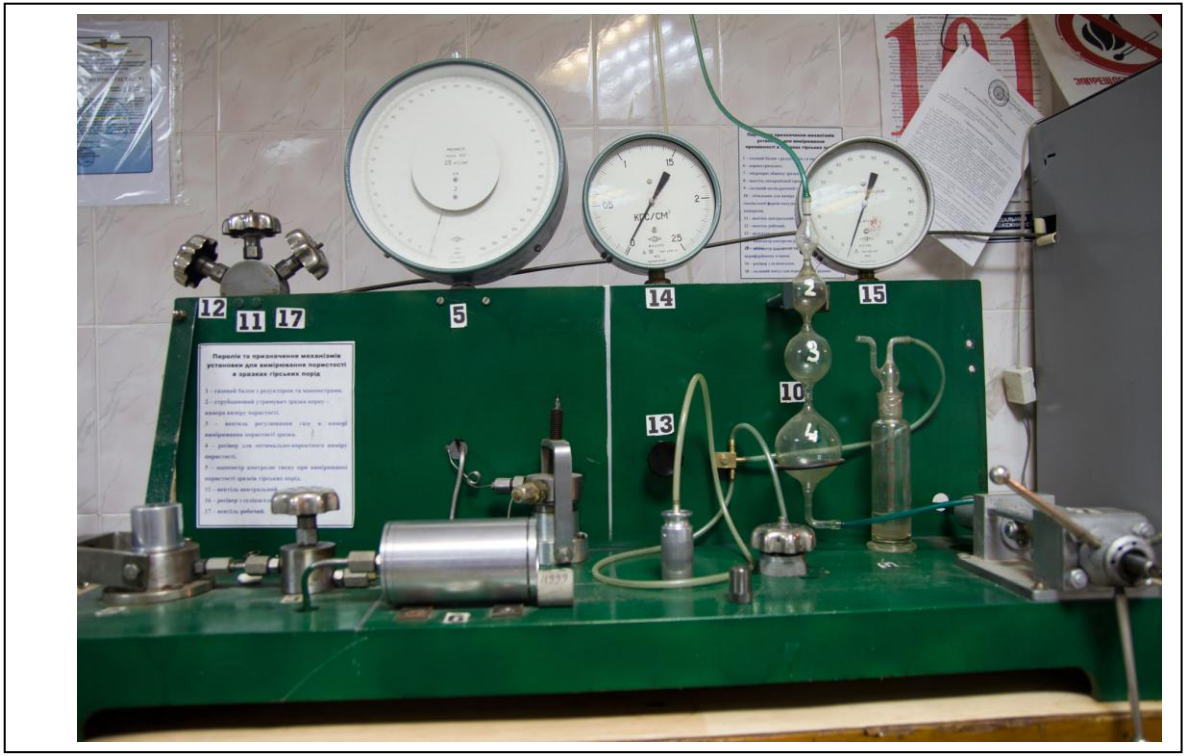

Рис. 4.1 Установка для визначення пористості та проникності гірських порід

Вимірюється час проходження газу через зразок, тобто час наповнення кожної камери. Розраховуються загальні витрати газу Q. Попередні результати записуються в таблицю (приклад – таблиця 4.1).

Для переведення всіх одиниць в систему *СІ* використати таблицю 4.2.

Таблиця 4.1.

Форма таблиці результатів досліджень

№	1 камера		2камера		3камера		4камера		Загальний		Q	F,	$К_{пр.}$,
	t,c	V,$см^3$	t,c	V, $см^3$	t,c	V,$см^3$	t,c	V,$см^3$	t,c	V,$см^3$	$см^3/с$	$см^2$	$мкм^2$
1		8,65		33,5		60,1		167,35					
2													

Таблиця 4.2.

Співвідношення між одиницями вимірювання тиску

	МПа	бар	мм.рт.ст.	атм.	$кгс/см^2$	PSI
1 МПа	1	10	7500,7	9,8692	10,197	145,04
1 бар	0,1	1	750,07	0,98692	1,0197	14,504
1мм.рт.ст.	133,32 Па	1,333*10-3	1	1,316*10-3	1,359*10-3	0,01934
1 атм.	0,10133	1,0133	760	1	1,0333	14,696
1 $кгс/см^2$	0,098066	0,98066	735,6	0,96784	1	14,223
1 PSI	6,8946 кПа	0,068946	51,715	0,068045	0, 070307	1

Лабораторна робота № 5
5. Визначення коефіцієнту залишкової водонасиченості

Теоретична частина

Відомий цілий ряд непрямих лбораторних методів визначення залишкової водонасиченості. Це методи:

- полупроникної мембрани,
- центрифугування,
- висушування по Мессеру,
- Тейлора,
- Капілярної витяжки,
- Аспіраційної термомасометрії,
- ядерно-магнітного резонансу,
- по вмісту хлор-іону в водній витяжці,
- сорбційний,
- по залежності ефективної газопроникності від водонасичення тощо

Найбільш часто застосовується метод центрифугування, що пояснюється його швидкістю та наявністю апаратури, що випускається серійно.

В більшості рекомендацій при моделюванні залишкової води методом центрифугування зразок обертається в центрифузі з певною швидкістю в повітряному середовищі. Останнє може внести доволі суттєві помилки за рахунок неконтрольованого випаровування, тому що дослід проходить протягом певного часу [Тульбович Б.И. Петрофизическое обеспечение эффективного извлечения углеводородов / М.: Недра, 1990 – 186 с.].

Друге принципове питання метода – вибір формули для визначення капілярного тиску, який створюється на зразок.

Для однофазного насичення капілярний тиск розраховується за формулою:

$$p_к = 4\pi R i^2 l(\sigma_1 - \sigma_2),$$

де R – радіус обертання, який приймається рівним відстані від центра осі центрифуги до середини зразка,

i - число обертів центрифуги,

l - довжина зразка,

σ_1 - густина фази, що насичує зразок (мінералізована вода),

σ_2 – густина фази, що витісняється (повітря)

А для зразків, що насичені двома рідинами, вважається більш вірною формула [Орлов Л.И, Дядькин И.Г., Горбачева З.М. теоретический анализ определения размеров капиляров в образцах горных пород с помощью

центрифуги //ВИЭМС /т Геология, методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – 1980. – в.11. – С. 9-22.]:

$$p_к = 1{,}11 \cdot 10^{-8} i^2 (\sigma_1 - \sigma_2)(\frac{lR}{4} + \frac{l^2}{9}).$$

Завдання:

1. Опрацювати теоретичний матеріал щодо визначення ємнісних параметрів гірських порід, зокрема, коефіцієнту залишкової водонасиченості.
2. Провести визначення коефіцієнту залишкової водонасиченості (за методом центрифугування).
3. Зробити висновки

Для визначення коефіцієнта залишкової водонасиченості $К_{в\ зал}$ необхідно дослідити залежність коефіцієнта водонасиченості $К_в$ від капілярного тиску в зразку.

Для виконання роботи використовуються результати центрифугування зразків, що насичені моделлю пластової води, зокрема,

- маса сухого зразка m_c,
- маса водонасиченого зразка $m_{вн}$,
- маса води, що залишилася в зразку після центрифугування при кожному *i* -тому числі обертів ротору (від1000 до 6000 за секунду),
- геометричні розміри зразка.

Обробка результатів центрифугування:

1. Розрахувати масу води, що міститься в керні до початку центрифугування:

$$m_{в\,0} = m_{вн} - m_c,$$

де $m_{вн}$, m_c - маса сухого керна і маса водонасиченого зразка керна.

2. Розрахувати масу води, що залишилася в керні після центрифугування при кожному *i* -тому заданому числі оборотів:

$$m_{вi} = m_{вн\,i} - m_c$$

3. Коефіцієнт початкової водонасиченості (перед початком центрифугування) приймається рівним одиниці.

$$К_{в\,0} = 1$$

4. Розрахувати коефіцієнт водонасиченості керна після центрифугування на кожному із заданих чисел оборотів:

$$К_{в\,i} = m_{вн\,i} / m_{в\,0}$$

5. Розрахувати капілярний тиск за формулою:

$$p_к = 4\pi R i^2 l(\sigma_1 - \sigma_2)$$

6. Результати розрахунків занести в таблицю (табл. 5.1).

Таблиця 5.1.

Форма таблиці результатів досліджень

№	Число обертів ротору n	Маса водонасиченого зразка, $m_{вн\ i}$	Маса води, що залишилася в зразку $m_{в\ i}$	Коефіцієнт водонасиченості $К_{ві}$	Капілярний тиск $p_{кі}$ МПа
	0				0,000
1	1000				0,025
2	2000				0,100
3	3000				0,225
4	4000				0,400
5	5000				0,625
6	6000				0,900

7.. Побудувати графічну залежність «капілярний тиск-коефіцієнт водонасичення» (приклад – на рис. 5.1).

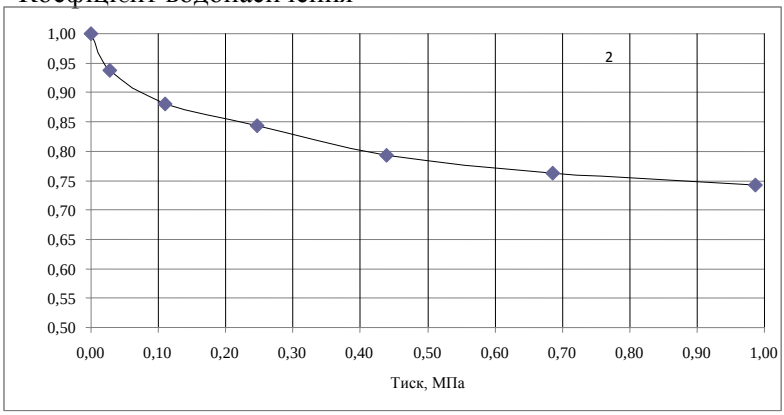

Рис. 5.12. Приклад залежності «коефіцієнт водонасичення - капілярний тиск»

8. За графіком визначити коефіцієнт залишкової водонасиченості $К_{в\ зал}$ як мінімальне значення коефіцієнта водонасиченості, яке не зменшується при збільшенні тиску.

9. Зробити висновки

Лабораторна робота № 6
6. Визначення питомого електричного опору

Завдання:

1. Опрацювати теоретичний матеріал щодо визначення електричних параметрів гірських порід, зокрема, питомого електричного опору.
2. Провести вимірювання опору порід
3. Провести визначення питомого електричного опору.
4. Зробити висновки

Вимірювання **питомого електричного опору** (і провідності) порід здійснюють із використанням двохелектродного і чотириелектродного методів.

В двоелектродному методі вимірюється електричний опір, площа поперечного перетину і довжина зразка. Питомий електричний опір розраховується, формула розрахунку залежить від форми електродів, найпростіша формула:

$$\rho = \frac{RS}{l},$$

де R –електричний опір зразка, S – площа поперечного перетину зразка, l – довжина зразка, а при використанні дискових електродів використовують формулу:

$$\rho = \frac{R}{\frac{1}{d} + \frac{l}{S}},$$

де d – діаметр електроду.

В чотириелектродному методі визначається падіння напруги ΔU при пропусканні струму I. Питомий електричний опір розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot \mathrm{K},$$

де К – константа, яка залежить від параметрів електричної установки.

Для моделювання досліджування питомого опору в природних умовах насичують зразки водою (мінералізація якої відповідатиме умовам залягання).

Основні похибки в вимірювання вносять електродна поляризація і поверхневі струми (постійний струм), ємнісні ефекти (змінний струм) тощо.

При лінійному розташуванні електродів поверхня на якій здійснюється вимірювання має бути плоскою, а при розташуванні електродів на торцях зразок повинен мати форму циліндра або паралелепіпеда.

Вибір конкретних вимірювальних засобів (місткові, резонансні, імпульсні) та приладів залежить від величини електричного опору зразків та частот, які застосовуються.

Питомий електричний опір гірських порід

Електричні властивості гірських порід (табл. 6.1) залежить від великої кількості факторів різної природи:

- мінерального складу,
- пористості;
- тріщинуватості,
- вологості,
- мінералізації рідини, що насичує зразок,
- структури і текстури породи,
- температури та тиску тощо.

Однак, враховуючи різку відмінність більшості електричних параметрів мінерального скелету та газово-рідинних заповнювачів (питомий електричний опір твердої фази, наприклад, перевершує опір рідкої фази на 6-8 порядків, а газова фаза є діелектриком), можна говорити про визначальну роль фазового складу, структури пустотного простору і структури включень електроннопровідних мінералів.

Як і інші речовини, гірські породи за природою провідності діляться на електричні провідники (провідники I роду), в яких електричні заряди переносяться вільними електронами, та іонні провідники (провідники II роду), в яких електричні заряди переносяться іонами розчинів, що заповнюють пори, тріщини тощо. В деяких випадках можна говорити про змішаний механізм провідності. У більшості гірських порід опір породоутворюючих мінералів є дуже високим. Подібні гірські породи у першому наближенні можна вважати такими, що складаються із мінерального скелету і природного розчину, який заповнює пори і тріщини.

Їх електропровідність визначається:

1) електропровідністю мінерального скелету, яка завдяки високому опору породоутворюючих мінералів мало впливає на електропровідність в цілому;

2) розподілом в породі електропровідних рудних та акцесорних мінералів;

3) електропровідністю вільної води;

4) поверхневою електропровідністю, спричиненою наявністю на зернах породи поверхневого, зв’язаного шару води;

5) розподілом в породі непровідних газових включень.

Другий фактор є надзвичайно важливим при формуванні електричних властивостей руд, а три останні - є домінуючими при визначенні

електропровідності більшості осадових, метаморфічних та вивержених порід.

Таблиця 6.1 – Питомий електричний опір деяких порід (за Н.Б.Дортман і В.М.Кобрановою)

Порода	ρ, Ом·м		
	з гігроскопічною вологістю	з капілярною вологістю (слабко солоні води)	з вкрапленням рудних мінералів, графіту, вуглистої речовини
Кристалосланець	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$5\cdot10^{2}\ldots1\cdot10^{5}$	$5\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{3}$
Гнейс	$1\cdot10^{4}\ldots1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{4}$	$1\cdot10^{1}\ldots5\cdot10^{1}$
Амфіболіт	$1\cdot10^{6}\ldots1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	-
Мармур	$1\cdot10^{6}\ldots1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	-
Кварцит	$1\cdot10^{6}\ldots1\cdot10^{8}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$5\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{3}$
Роговик	$1\cdot10^{6}\ldots1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{6}$	$5\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{3}$
Скарн	$1\cdot10^{6}\ldots1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{6}$	$5\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{3}$
Глина	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$	-
Аргіліт	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$2\cdot10^{1}\ldots2\cdot10^{2}$	-
Сланець глинистий	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$5\cdot10^{1}\ldots5\cdot10^{2}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Алевроліт	$1\cdot10^{4}\ldots1\cdot10^{6}$	$2\cdot10^{1}\ldots2\cdot10^{2}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Пісковик пористий	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	$3\cdot10^{1}\ldots2\cdot10^{2}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Пісковик щільний	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{2}\ldots1\cdot10^{3}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Конгломерат	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{2}\ldots1\cdot10^{3}$	-
Мергель	$1\cdot10^{4}\ldots1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{2}\ldots1\cdot10^{3}$	-
Вапняк масивний	$1\cdot10^{4}\ldots1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Вапняк тріщинуватий	$1\cdot10^{4}\ldots1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{2}\ldots1\cdot10^{3}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Доломіт	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{1}\ldots1\cdot10^{2}$
Ангідрит	$1\cdot10^{4}\ldots1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{3}\ldots1\cdot10^{5}$	-
Гіпс	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{5}\ldots1\cdot10^{6}$	-

Питомий опір газонасичених (з видаленою гігроскопічною вологою) порід різного складу в цьому випадку відрізняється майже виключно за рахунок відмінності опору породоутворюючих мінералів.

Так, граніти і кварцові порфіри, для яких характерний високий вміст кварцу і біотиту (мінерали з найгіршою провідністю), мають вищий опір,

ніж габро і базальти, породоутворючі мінерали яких (польові шпати, піроксени) мають дещо вищу провідність.

Більш різке зростання провідності при водонасиченні кислих відмін інтрузивних порід порівняно з ультраосновними, обумовлено меншою пористістю і тріщинуватістю останніх.

Наразі вплив мінерального складу на величину питомого опору є найпомітнішим у випадку низькопористих недеформованих відмін порід, електропровідність яких є близькою до електропровідності мінерального скелету.

Якщо в породі з високим опором породоутворюючих мінералів провідні компоненти (заповнені водою пори, рудні мінерали) знаходяться у вигляді ізольованих включень, то вони не справляють суттєвого впливу на електропровідність породи: для того щоб опір порід почав знижуватися обсяг сферичних включень повинен перевищити 70%, а еліпсоїдних - 50%. Водночас, наявність в породі кількох відсотків безперервно пов'язаних між собою провідних компонентів (рудні прожилки і заповнені електролітом тріщини) є достатньою причиною для зменшення питомого опору на декілька порядків. Понад те, якщо вміст безперервно пов’язаних між собою провідних компонентів перевищує 10-20% то питомий опір порід стає близьким до питомого опору провідників.

Значно менший питомий опір гірських утворень що насичені водою, обумовлений збільшенням водонасиченості порового простору.

Найбільш різка зміна властивостей такого роду відмічається у крупнозернистих пісках, гальці, сильно тріщинуватих скельних породах. Так, сухі піски можуть мати опір, що сягає десятків тисяч омметрів, тоді коли в умовах повного вологонасичення він знижується до десятків, а при сильно мінералізованих водах і до одиниць Омметрів.

Відсутність залежностей подібного роду в глинах обумовлена високим (20-40 % і більше) вмістом в них міцно- і рихлозв’язаної води. Зменшення електропровідності глин континентального походження ($\rho = 5 \div 20$ Ом·м) порівняно з морськими ($\rho = 1 \div 10$ Ом·м) пов’язане як зростанням домішки уламкової компоненти (питомий опір суглинків і супісків ще вищий - $20 \div 60$ Ом·м) так і з зміною мінералізації плівкової води.

Прилади:

- кернотримач,
- електроди – латунні пластинки діаметром 35 мм. та товщиною 0,7 мм, до них припаяні дроти, які приєднані до затискачів моста, розчин (хлористий Na, Ca, Mg);
- мегометр, RLC-метр або міст електричний.

Методика виконання роботи:

1. Налаштовують прилад (заземлюють, еталонують);
2. Зразок закріплюють в керноутримувачі;
3. Для щільного контакту затискують зразок (до 3 кГ м/см^3)
4. Визначають опір зразка (R).
5. Розраховують питомий електричний опір (ρ) зазвичай за формулою

$$\rho = R_{зр} S / l,$$

але якщо взяти до уваги, що в керноутримувачі ми маємо дискові датчики, то формула за рахунок їх впливу має вигляд:

$$\rho = \frac{R_{зр}}{\frac{1}{d} + \frac{l}{S}}$$

де $R_{зр}$ - опір зразка, S – площа поперечного перерізу, l – довжина зразку, d – діаметр контакту зразка з дисковим датчиком.

6. Результати досліджень заносять в таблицю.

Таблиця 6.1.

Форма таблиці результатів досліджень

№ зразка	R, Ом	S, м^2	l, *м*	ρ, Ом*м

Лабораторна робота № 7
7. Дослідження швидкостей пружних хвиль гірських порід

Завдання:

1. Опрацювати теоретичний матеріал щодо визначення пружних параметрів гірських порід, зокрема, швидкостей повздовжніх та поперечних хвиль.
2. Провести вимірювання фазової швидкості повздовжніх хвиль зразків порід.
3. Провести вимірювання 2-х фазових швидкостей поперечних хвиль з поворотом зразка на 90^0.
4. Зробити висновки

Теоретична частина

При вимірюванні пружних характеристик мінералів та гірських порід застосовують дві групи методів – статичні та динамічні.

Статичні методи використовуються в першу чергу для визначення пружних модулів, їх загальною рисою є пряме вимірювання тензометрами деформацій зразків. Вимірювання модуля Юнга здійснюється при одновісному стиску або розтягу, а також згинанні стержня з породи, модуля зсуву - при скручуванні зразка, коефіцієнту Пуассона - при вимірюванні поздовжніх та поперечних деформацій одновісного стиску, модуля об'ємного стиску - при стиску зразка всебічним тиском.

Власне кажучи при інженерно-геологічних вишукуваннях пружні характеристики визначають виключно статичними методами, оскільки саме вони дають найбільш точну характеристику міцності речовини в конкретній системі напружень. Величини пружних модулів розраховані за швидкостями пружних хвиль, як правило, завищені (реальне середовище не є ні ідеально-пружним, ні ізотропним), і не можуть використовуватись для оцінки стійкості масиву, фундаментів, споруд, виробів тощо.

У всіх інших випадках (при геофізичних дослідженнях, речовинно-фізичному і структурному моделюванні) найчастіше застосовують динамічні методи визначення пружних характеристик, які дозволяють фіксувати час проходження пружної хвилі через зразок, та швидкість її затухання.

Динамічні методи вимірювань розрізняють за способами збудження:

- динамічний резонансний метод, де використовуються стоячі хвилі збуджувані зовнішнім джерелом;
- метод пластини, що обертається на шляху безперервної пружної хвилі;
- методи послідовних ультразвукових імпульсів, в т.ч. лазерний);

- реєстрації (першого вступу, фазовий, резонансний тощо) хвиль пружності.

Вимірювання швидкості у довільному обраному напрямку, як правило, не дає можливості оцінити пружні характеристики порід та мінералів – необхідно здійснити, як мінімум (кубічна сингонія), три визначення у взаємно перпендикулярних напрямках (за умови що ці напрямки співпадають з осями тривісного еліпсоїда). Тож оптимальною формою зразків для вимірювань є куборомбододекаедр, або, в простих випадках – куб.

Однією з властивостей анізотропних середовищ є акустичний дихроїзм (анізотропія лінійного поглинання) – здатність різним чином поглинати поляризовані поперечні коливання при повороті вектора поляризації відносно структурних елементів середовища. Напрямки найбільшого та найменшого пропускання в гірських породах пов'язані, як правило, з орієнтацією лінійних, витягнутих вздовж одного напрямку кристалів.

Серед основних методик, що дають можливість вивчати пружну анізотропію порід, виділяють наступні:

- метод ортогональних напрямків;
- метод сфери;
- акустополяризаційний метод;
- інваріантно-поляризаційний метод.

Експериментальні вимірювання швидкостей повздовжніх і поперечних хвиль в методі ортогональних напрямків здійснюються в трьох різних циліндричних зразках, що вирізані з одного блоку породи і орієнтовані один відносно другого під прямим кутом. Дослідження виконуються при кімнатній температурі і гідростатичному тиску до 10 кбар. В якості п'єзоелектричних перетворювачів, випромінювача і приймача повздовжніх хвиль використовуються п'єзокерамічні датчики з частотами близько 2Мгц. Для збудження поперечних хвиль використовуються кварцові датчики з частотою 1Мгц. При проведенні ультразвукових вимірювань застосовується імпульсний метод.

Методика вимірювань методу сфери полягає у тому, що сферичний зразок, що спеціально підготовлений до досліду, в процесі експерименту дискретно повертається з кроком 150 у напрямку обох координат (λ і φ). За початок координат обирається їх положення, що співпадає з площиною екватора зразка (φ=00). Після завершення одного повороту сфери (від 00 до 3600) з кроком 150 держак датчиків повертається на той же кут по відношенню до попереднього положення. Потім вимірювання проводяться з тим же кроком.

Суть акустополяризаційного методу полягає в реєстрації амплітуди чисто поперечних лінійно-поляризованих ультразвукових коливань, що розповсюджуються в зразках гірських порід шляхом повороту зразка відносно векторів поляризації випромінюючого і приймального перетворювачів на кут 360^0. Дослідження здійснюються при різній орієнтації векторів поляризації випромінювача і приймача ультразвукових коливань.

Інваріантно-поляризаційний метод. За методикою досліджень спершу зразок виготовляється у виді куба із зрізаними ребрами - куборомбододекаедра. Вимірюються швидкості розповсюдження повздовжніх Vp і поперечних Vs хвиль в кожному з 9 напрямків (в кожному напрямку вимірюються дві поперечні хвилі з взаємно ортогональними напрямками зміщення). Великою перевагою представленого метода є можливість отримання повного набору пружних постійних для середовищ визначеної симетрії, які, в свою чергу, дають повну характеристику пружної анізотропії середовища, дозволяють обчислювати величини швидкостей повздовжніх і поперечних хвиль для довільного напрямку в середовищі.

Швидкість поздовжніх хвиль в **осадових породах,** пустотний простір яких, як правило, насичений різноманітними флюїдами (газ, вода, нафта), визначається:

- пористістю і структурою пустотного простору,
- складом породи,
- типом флюїду,
- віком,
- глибиною залягання.

Діапазон зміни швидкості пружних поздовжніх хвиль в осадових породах набагато ширший, ніж в магматичних (див. табл. 7.1) - від 0,3 км/с в неущільнених піщано-глинистих породах до 6-7 км/с в добре зцементованих теригенних відкладах. В карбонатних породах за однакових величин пористості швидкість є максимальною в відмінах з кавернозною пористістю, оскільки коефіцієнт стискуваності каверн істотно нижчий ніж гранулярних пор. Вплив віку на швидкість розповсюдження пружних хвиль в осадових породах зумовлений діагенетичними змінами і інтенсивним впливом на них складкоутворюючих процесів. Вплив глибини залягання порід на швидкість визначається термодинамічною обстановкою. Із збільшенням глибини підвищуються тиск і температура, що впливає на структуру і склад порід і на їх фізичні параметри. Вплив насичення на пружні властивості залежить від складу породоутворючих мінералів і домішок в породі, структури і міри зцементованості, а також виду наповнювача (можливість розвитку процесів

набухання, розчинення тощо). Так, насичення глин і глинистих пісковиків водою призводить до розбухання глинистих мінералів, втрати зв'язків між зернами в породі і зменшенню швидкості.

Таблиця 7. – Діапазони зміни швидкості поширення поздовжніх хвиль (в км/с) в осадових породах (f=0,33 МГц, за [7]).

Порода	V_{Pmin}– V_{Pmax}	Порода	V_{Pmin}- V_{Pmax}	Порода	V_{Pmin}- V_{Pmax}
Алевроліт	0,8-4,0	Гіпс	1,5-4,6	Конгломерат	1,45-5,6
Ангідрид	1,5-6,0	Доломіт	0,9-6,3		
Аргіліт	0,9-4,5	Вапняк	1,0-5,5	Пісок	0,3-1,5
Брекчія	1,45-5,6	Крейда	1,7-4,2	Пісковик	0,8-4,5
Глина	0,3-3,0	Мергель	1,3-4,5	Кам'яна сіль	4,5-5,5
Гравеліт	1,7-5,4	Суглинок	0,8-1,8		

Вплив віку на швидкість розповсюдження пружних хвиль в осадових породах зумовлений діагенетичними змінами і інтенсивним впливом на них складкоутворюючих процесів.

Кавернозність колекторів також знижує значення швидкостей пружних хвиль, але кавернозна пористість, що дає відчутний вплив, виражається в процентах та долях процента.

На величину пружних параметрів, крім власне величини пористості впливає також структура пустотного простору – вплив міжзернової пористості як правило значно слабший за вплив мікротріщин та каверн. Так, зростання міжзернової пористості в породах на 1-2 % призводить до незначного зниження величини V_P, збільшення ж текстурної пористості (за рахунок мікротріщинуватості) на 0,2-0,3 % супроводжується зменшенням пружних характеристик на 10-40 %. Це дозволяє зробити висновок про те, що в породах основний вплив на пружність речовин чинить тріщинна пористість.

Вплив глибини залягання порід на швидкість визначається термодинамічною обстановкою. Із збільшенням глибини підвищуються тиск і температура, що впливає на структуру і склад порід і на їх фізичні параметри.

Вплив насичення на пружні властивості залежить від:

- складу породоутворюючих мінералів і домішок в породі,
- структури і міри зцементованості, а також
- виду наповнювача (можливість розвитку процесів набухання, розчинення тощо).

Наприклад, насичення глин і глинистих пісковиків водою призводить до розбухання глинистих мінералів, втрати зв'язків між зернами в породі і

зменшенню швидкості.

Вплив складу пустотного наповнювача на пружні параметри стає особливо помітним за підвищеної пористості, однак навіть в низькопористих відмінах кристалічних порід виміряна в газонасичених і водонасичених зразках величина V_P може відрізнятися на 500-1000 м/с (ультраосновні породи) чи 1000-2000 м/с (гранітоїди), а для осадових порід в залежності від пористості - до 100%.

Очевидною є залежність різниці значень швидкості в газонасичених і водонасичених породах від їх пористості і структури пустотного простору. Із зменшенням пористості ця різниця скорочується.

Очевидною є залежність різниці значень швидкості в газонасичених і водонасичених породах від їх пористості і структури пустотного простору. Із зменшенням пористості ця різниця скорочується.

Швидкість повздовжніх хвиль V_P значно зростає із збільшенням мінералізації пустотного наповнювача. Ефект збільшення V_S при насиченні порід рідиною обумовлений наявністю в рідині асоціацій молекул із відносно фіксованим положенням, спроможних передавати зсувні хвилі. Величина зростання V_S визначається розкриттям мікротріщин. Відмінність характеру зміни швидкостей подовжніх і поперечних хвиль при насиченні порід рідиною призводить до збільшення відношення V_P/V_S: від 1,5-1,9 до 1,6-2,2.

Анізотропія пружних властивостей, яка виявляється в залежності швидкості пружних хвиль від напрямку поширення хвилі, відзначається в більшості порід. Вона обумовлена закономірним розташуванням пустотного простору, мінеральних зерен і будовою мінералів.

Апаратура:

1. Установка для вимірювання пружних хвиль зразків,
2. Комп'ютер з програмою «Керн»

Методика ультразвукових вимірювань фазових швидкостей пружних хвиль гірських порід задовольняє жорстким вимогам.

Вибір розміру зразка здійснюється відповідно до умови квазіоднорідності

$$V>>L3n \text{ і } \lambda >>L_n$$

де L_n - характерний розмір структурних неоднорідностей гірської породи, а λ - довжина хвилі,

згідно з якою макроскопічний об'єм зразка гірської породи повинен у багато разів перевищувати характерні розміри її структурних неоднорідностей.

Для досягнення високої точності при вимірюваннях фазових швидкостей ультразвукових хвиль в зразках гірських порід необхідно враховувати взаємно виключаючи умови. З одного боку, для досягнення високої точності вимірювання часу розповсюдження хвилі в зразку доцільно проводити вимірювання його на максимально можливій частоті, але з іншого боку - високочастотні коливання швидше затухають, що спричиняє спотворення частотного спектру і форми імпульсу та також проявляється частотна дисперсія швидкості.

При дослідженнях у зразках, що сильно поглинають, акустичний зондуючий імпульс повинен мати добре виражений максимум спектральної щільності на несучій частоті і задовольняти умові монохроматичності стаціонарного спектра. Його тривалість повинна бути такою, щоб забезпечити стаціонарний режим коливань в акустичному імпульсі, який розповсюджується в зразку гірської породи. Синфазне співставлення сигналів здійснюється в стаціонарній області імпульсного сигналу.

При проведенні ультразвукових вимірювань фазових швидкостей також беруться до уваги дифракційні ефекти, які обумовлені розмірами п'єзоелектричних випромінювачів і приймачів ультразвукових хвиль та анізотропією гірських порід.

При вимірюванні фазових швидкостей різної поляризації приймалося до уваги, що в сильно анізотропних породах спостерігаються інтенсивні ефекти акустичного двохпроменевого заломлення хвилі поперечної поляризації.

Установка для вимірювання пружних хвиль представляє собою:

1. Прилад «Керн-4» для вимірювання пружних хвиль зразків,
2. Кернотримачі з датчиками для вимірювання хвиль різних поляризації.
3. З'єднувальні кабелі

Прилад «Керн-4» складається з блоків: зондуючий генератор імпульсів, підсилювач сигналу, синхрогенератор, блок управління. Кернотримачі мають пьезодатчики для збудження та прийому пружних хвиль.

Хід вимірювання:

1. Перед вимірами слід переконатись що всі прилади під'єднані до блоку живлення. Також потрібно перевірити правильність під'єднання кабелів сигналу від п'єзоперетворювачів до установки «Керн-4».

2. Включити програму *Керн* на комп'ютері.

3. В програмі вибираємо робочу частоту (для нашого випадку 700 Гц). В залежності від поставлених задач вибираємо кількість згенерованих імпульсів (від 1 до 11, рекомендовано – 4).

4. Визначення фазової швидкості повздовжньої хвилі.

Зондуючий генератор імпульсів генерує два цуга імпульсів, один з яких (синусоїдальний) подається на вимірювальну лінію, а другий (прямокутний) – на фіксуючу апаратуру.

За допомогою кнопки посилення сигналу виставляємо потрібне нам значення, що відображається при тому чи іншому ослабленні на екрані комп'ютера.

Співставлення імпульсів (прямокутного і синусоїдального) на екрані проходить наступним чином. Після встановлення необхідної амплітуди сигналу співставляємо отримані на екрані сигнали по добре вираженим фазам, зазвичай по другому імпульсу. За допомогою кнопки збільшення масштабу розгортки сигналу збільшуємо поступово сигнал и уточнюємо значення часу.

На початку та при закінченні роботи вимірюємо час проходження сигналу при зімкнутих п'єзодатчиках для правильних розрахунків.

Для перевірки готовності установки до вимірів проводяться дослідження стандартного зразка (еталону). Вимірюють довжину еталону і встановлюють між торцями ліній затримки приймального і випромінюючих п'єзоперетворювачів. Вимірюють швидкість розповсюдження повздовжньої хвилі в стандартному зразку (сталь V_p = 5963 м/с).

Ефективна фазова швидкість поширення пружної хвилі υ^* в стандартному зразку обчислюється в програмі автоматично за формулою:

$$\upsilon^* = \frac{l}{t - t_0}, \qquad (7.1)$$

де l - довжина зразка; t_0 - час поширення ультразвукової хвилі в затримках; t- час поширення ультразвукової хвилі між затримками при наявності зразка.

Так як розгортки на екрані зміщенні на одну довжину хвилі генератора затримки, час якого ми змінюємо, з'єднуючи сигнали на екрані, час затримки хвилі генератора вимірюється встроєним частотоміром.

Тобто час розповсюдження однієї хвилі відповідає часу затримки – часу проходу акустичної хвилі.

На наступному кроці вимірюють час розповсюдження повздовжньої хвилі в лінії затримки (без зразка) в Гц для отримання нульового значення часу проходження хвилі через затримки (t_0).

Так само як з еталоном проводяться вимірювання зразків. При вимірюваннях обов'язковим є проведення контрольних досліджень по 1 з колекції різних типів.

5. Визначення фазової швидкості поперечної хвилі

Оскільки в анізотропних породах спостерігаються інтенсивні ефекти акустичного двопроменевого заломлення хвилі поперечної поляризації, при вимірюванні фазових швидкостей поперечних хвиль вимірюються 2 хвилі різної поляризації – «швидка» і «повільна» квазіпоперечні хвилі.

Відомо, що поперечна хвиля розповсюджується тільки в твердих середовищах Тому при вимірюваннях для необхідного твердого контакту використовується розчин каніфолі на спирту, що швидко застигає і дає можливість вимірювання швидкостей поперечних хвиль.

Доведено, що 2 моди поперечної хвилі розповсюджуються під кутом близьким до 90^0, що і необхідно витримувати при петроакустичних дослідженнях таких хвиль.

Однак, на відміну від повздовжньої хвилі при реєстрації поперечних хвиль виникає ускладнення її фіксації завдяки іншим типам хвиль, що присутні в цьому діапазоні. Поперечна хвиля виділяється при найбільшій амплітуді приймального правильного синусоїдального сигналу.

В іншому основні кроки методики вимірювань співпадають із вимірюваннями швидкостей повздовжніх хвиль.

6. **Оформлення результатів досліджень** провести в табличному (табл. 7.2) та текстовому вигляді

Таблиця 7.2

Приклад оформлення результатів досліджень

№ зразка	Товщина зразка	Швидкість повздовжньої хвилі	Швидкість поперечних хвиль	Помилка вимірювань
еталон	50			
Контроль №				

Нульовий відлік f_0 =

7.Зробити висновки

Лабораторна робота № 8
8. Вивчення анізотропії магнітної сприйнятливості зразків гірських порід (АМС) на капамістку KLY-2.

Завдання:

1. Налаштувати капамісток KLY-2,
2. Виміряти 3 зразки.
3. Обрахувати тензор та параметри АМС (L,F,P,T) в програмі ANIZO_10. Визначити тип анізотропії.
4. В програмі Anisoft винести на стереопроекцію напрямки осей АМС.

Прилади: капамісток KLY-2.

Методика

Суть тензорного методу дослідження анізотропії магнітної сприйнятливості полягає у визначенні тензора магнітної сприйнятливості, що є симетричним тензором другого рангу, за допомогою мінімум шести незалежних вимірів магнітної сприйнятливості "за напрямком". Потім за допомогою певних обчислень отримують власні значення тензора (головні сприйнятливості), різноманітні коефіцієнти анізотропії, застосовуючи які, можна дати характеристику магнітної текстури зразка, що досліджується. Основною перевагою тензорних методів вивчення анізотропії магнітної сприйнятливості є можливість однозначно кількісно описати магнітну анізотропію досліджуваної речовини. Методика вимірювань та розрахунків параметрів анізотропії магнітної сприйнятливості детально описана в роботі Tarling D.N., Hrouda E. Математично анізотропія магнітної сприйнятливості описується симетричним тензором другого рангу, який складений вимірами різниць магнітної сприйнятливості в трьох ортогональних площинах зразка.

$$k_{ij=}\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}$$

На вивченні цього параметра і базується тензорний підхід дослідження анізотропії магнітної сприйнятливості. Зразок в даній системі координат завжди може бути представлений через три головні компоненти тензора (К1 — максимальної, К2 — середньої, К3 — мінімальної). Тензор магнітної сприйнятливості можна представити у вигляді трьохосного еліпсоїда, який визначається ортогональними осями К1, К2 і К3 (рис.1). Найчастіше для дослідження магнітної структури (вивчення форми, орієнтації і розміру

еліпсоїду) користуються параметрами, що розраховуються на основі трьох головних компонент тензора K1, K2 і K3 [3].

Наведемо деякі з них:

æ=(K1+ K2 + K3)/3 — магнітна сприйнятливість (bulk susceptibility);

L= K1/K2 — коефіцієнт анізотропії L (magnetic lineation), покажчик ступеню магнітної лінійності;

F=K2/K3 — ступінь анізотропії F (magnetic foliation), відбиває ступінь площинно паралельного орієнтування магнітних мінералів;

P= K1/K3 — ступінь анізотропії P (anisotropy degree), інтегральний індикатор впорядкованості магнітних мінералів;

T= {[2(lnK2-lnK3)]/(lnK1-lnK3)}-1, параметр форми T (shape parameter).

За параметром форми T можна розділити еліпсоїди сприйнятливості на такі групи:

1) витягнутий (prolate) -1<T<0 (K1>>K2=K3), відповідає лінійній анізотропії, яка може бути викликана певним орієнтуванням видовжених зерен, що виникло, наприклад, внаслідок течії або дії зовнішнього магнітного поля на зерна, що випадають в осад;

2) нейтральний (neutral) T=0;

3) сплющений (oblate) 0<T<1 (K1=K2>>K3), відповідає площинній анізотропії, яку можна пояснити, зокрема, дією направленого тиску під час кристалізації породи, що містить магнітні зерна.

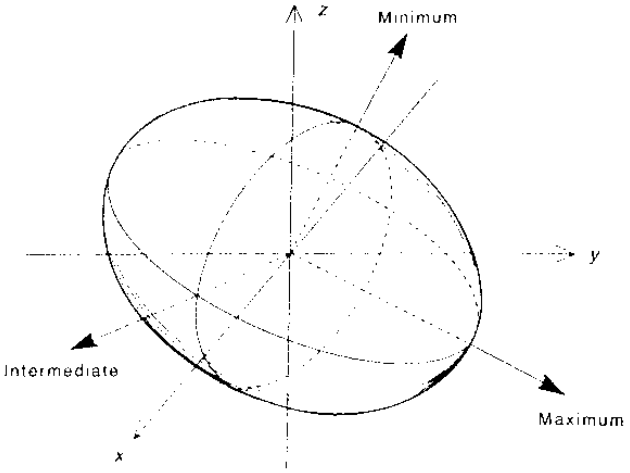

Рис.8.1. Еліпсоїд анізотропії. Тензор, що визначає анізотропію сприйнятливості зразка найбільш повно описується значеннями в трьох ортогональних напрямках, що відповідають головним компонентам тензора сприйнятливості.

Для наглядного представлення результатів вимірів користуються стереографічними проекціями. Проекції трьох головних компонент тензора магнітної сприйнятливості виносяться на сітку у вигляді умовних позначок (рис.8.2): Аналізуючи отримані стереографічні проекції, можна визначити тип анізотропії та загальні особливості утворень, що досліджуються.

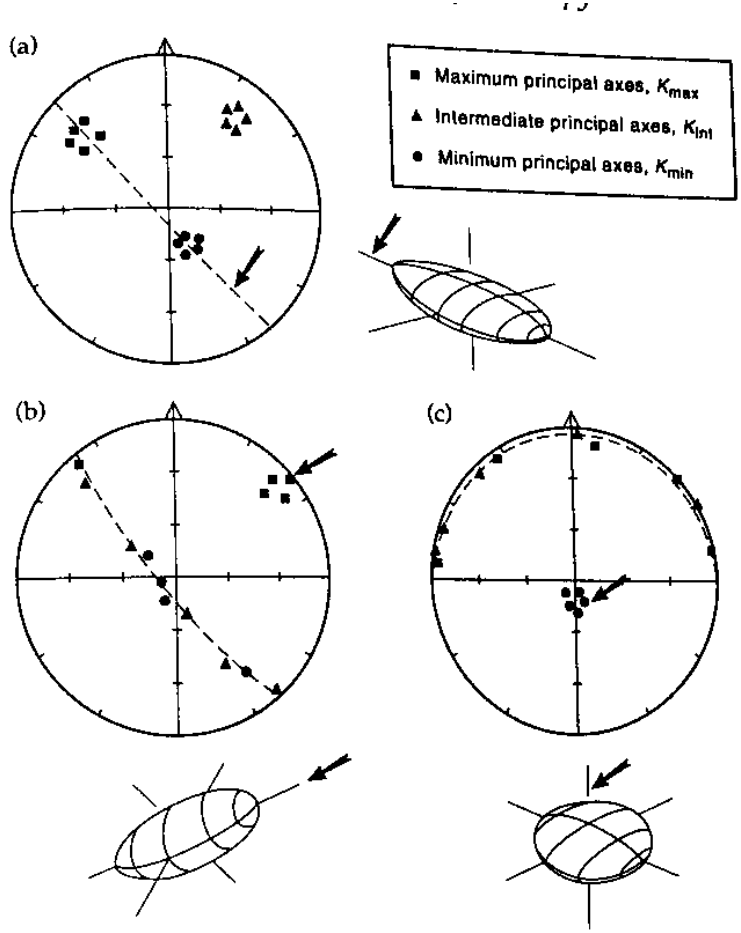

Рис.8.2. Графічне представлення результатів вимірів анізотропії магнітної сприйнятливості за напрямками в стереографічній проекції.

ОПИС КАПАМІСТКА KLY-2

Капамісток KLY-2 – прецизійний напівавтоматичний місток індуктивності - розроблений для вимірювання магнітної сприйнятливості

зразків гірських порід та анізотропії магнітної сприйнятливості (АМС). зразків гірських порід. Дія приладу базується на реєстрації зміни індуктивності в котушках при внесенні зразка гірської породи.1

Чутливість приладу для зразка номінального об`єму 10 см3 - 4*10-8 од. СІ.

Точність в межах одного диапазону ±0,1%, ±1 знак.

Точність абсолютного калібрування ±3%.

Прилад складається з двох окремих частин: реєструючий блок KLY-2.1, вимірювальний блок KLY-2.0.

Стандартний реєструючий блок KLY-2.1 розроблений для вимірювання зразків правильної форми об`ємом 10 см3 або фрагментованих зразків у стаканчику об`ємом 40 см3.

На рисунку 8.3 наведена схема індукційного лабораторного капаметра серії KLY.

При внесенні зразка, що вивчається, в котушку з током в ньому виникає е.р.с. Додаткова е.р.с., що виникає при цьому, пропорційна магнітній сприйнятливості.

Принцип роботи цього індукційного вимірювача магнітної сприйнятливості полягає в прецезійному вимірюванні додаткової індуктивності котушки із зразком. Для цього котушка-датчик (КД) і балансувальна котушка (КБ) (див.рис.) живляться змінним током з частотою 970 Гц від генератора Г через диференційний трансформатор Тр. При цьому на балансувальну котушку і котушку-датчик сигнал надходить в протифазі. При відсутності зразка обидві котушки за допомогою феритового стрижня Ф зрівнюються за індуктивністю. Наслідком цього є відсутність сигналу на виході містка, утвореного цими котушками (в точці Р). Введення зразка О в котушку-датчик призводить до збільшення її індуктивності і внаслідок цього з`являється напруга розбалансу. Вона компенсується за допомогою гілки: дільник Д — потенціометр П — посилювач У — котушка КЗ. За допомогою спеціальної радіотехнічної схеми И, яка працює за принципом фазочутливого посилювача, сигнал розбалансу вимірюється. Показання шкали багатооборотного потенціометра слугують мірою магнітної сприйнятливості.

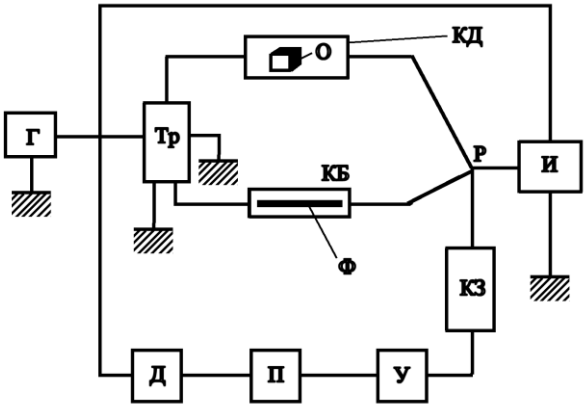

Рис.8. 3 Принципова схема лабораторного індукційного капаметра.

НАЛАШТУВАННЯ ПРИЛАДУ

1. Вмикання/вимикання приладу.

А) пересвідчитися, що прилад вимкнений;

Б) Перемикач RANGE встановити на самий високий диапазон (11-ий);

В) увімкнути прилад, дати йому прогрітися протягом щонайменше 5 хвилин.

Зараз прилад знаходиться у робочому режимі!

2. Ручне встановлення нуля

Виконується за допомогою ручки на вимірювальному блоці і потенціометру Im на реєструючому блоці. Ними виводимо на 0 дійсну та уявну компоненти напруги відповідно на обраному диапазоні вимірювань. При вимірюваннях постійно контролюємо, щоб індикатори не показували відхилення більше половини шкали. Процедура виконується в положенні WAIT або READY.

3. Калібровка приладу

Калібровка приладу виконується за допомогою еталон, сприйнятливість якого вказана на ньому для 5-го вимірювального диапазону.

Якщо відлік на дисплеї не відповідає занченню на еталоні, регулюємо його повертаючи гвинт CALIBRATION

Калібровку завершено.

4. Розв`язка фаз

Виконується за допомогою гвинта PHASE і потенціометру Im на реєструючому блоці.

Змінюючи уявну компоненту на ½ шкали, виставляємо дійсну на 0. Повторити кілька разів.

ВИМІРЮВАННЯ АНІЗОТРОПІЇ МАГНІТНОЇ СПРИЙНЯТЛИВОСТІ ЗРАЗКІВ

Вимірювальні положення для кубічних зразків наведені на рис. 8.4.

Вимірювальні положення для циліндричних зразків наведені на рис. 8.5.

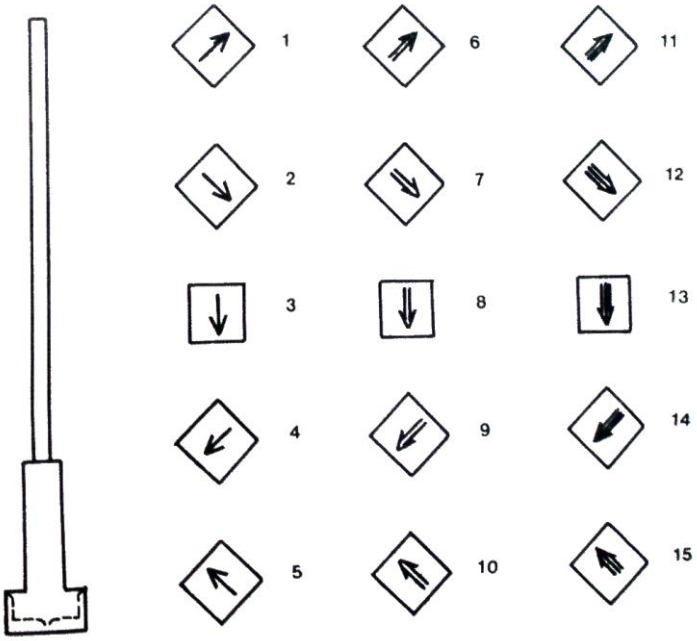

Рис.8.4 Маркування кубічного зразка для вимірювання анізотропії та схема орієнтації кубічного зразка при вимірюванні в 15 напрямках.

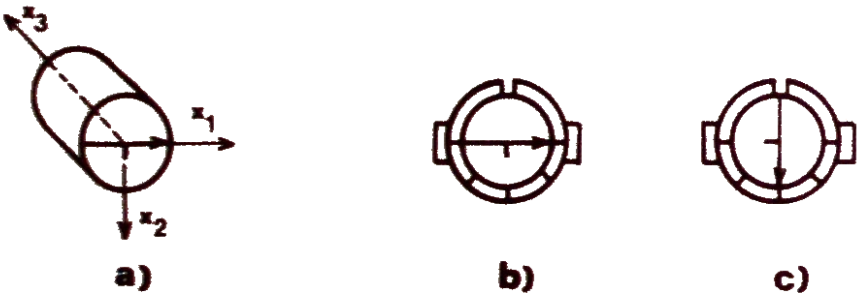

Рис. 8.5 Маркування циліндричного зразка для вимірювання анізотропії (а);
b) розташування циліндричного зразка в тримачі для вимірювань з 6 по 10;
c) розташування циліндричного зразка в тримачі для вимірювань з 11 по 15.

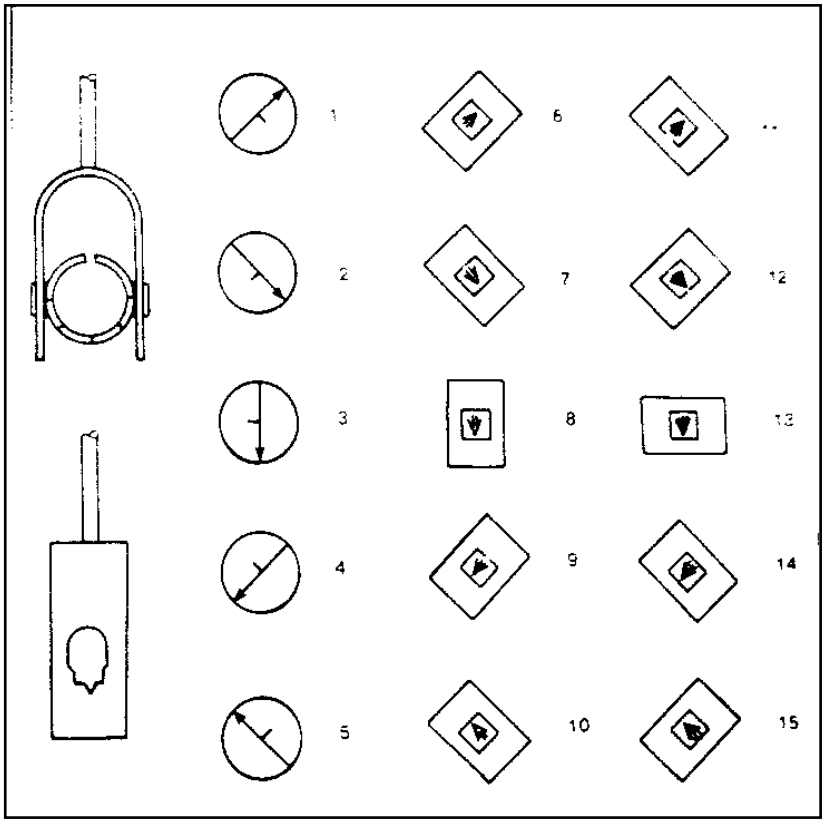

Рис. 8.6 Схема орієнтації циліндричного зразка при вимірюванні в 15 напрямках в тримачі з циліндричною капсулою.

Таблиця 8.1. - Таблиця діапазонних множників для KLY-2.

№ діапазону	множник $x10^{-6}$ (од.CI)	повний діапазон $x10^{-6}$ (од.CI)
1	0.05	100
2	0.1	200
3	0.2	400
4	0.5	1000
5	1	2000
6	2	4000
7	5	10000
8	10	20000
9	20	40000
10	50	100000
11	100	200000

ОБРОБКА ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Первинна обробка результатів вимірювань і розрахунок параметрів анізотропії виконується в програмі ANIZO10.

Побудова стереографічних проекцій головних осей еліпсоїда магнітної сприйнятливості виконується в програмі ANISOFT.

9. Обробка результатів комплексних петрофізичних досліджень зразків

Теоретична частина

Обробка результатів петрофізичних досліджень складається з етапів:

1. попередня обробка матеріалів;
2. математичний (статистичний) аналіз даних;
3. створення математичних моделей порід та їх асоціацій;
4. побудова петрофізичних карт і розрізів.

Попередня обробка полягає в складанні каталогів даних про склад і фізичні властивості порід на основі статистичного аналізу окремих петрофізичних параметрів. На цьому етапі проводиться повна перевірка результатів петрофізичних даних, їх уточнення та відбраківка, каталогізація за окремими літологічними групами порід.

Математичний аналіз дозволяє виділити петрофізичні групи та асоціації і встановити основні закономірності зміни фізичних параметрів.

При виділенні петрофизических груп порід застосовується метод групування за найбільш загальними і стійким ознаками: генетичному типу, складом, текстурно-структурними особливостями, типом діагенезу, метаморфізму тощо.

Для з'ясування розподілу фізичного параметра в межах попередньо виділеної петрофізичної групи використовують варіаційний ряд, де кожному значенню параметра x або інтервалу його зміни ΔN відповідає певна повторюваність значень параметра (частота).

Завдання:

1. Вивчити петрографічний опис зразків.
2. Визначити за результатами попередніх петрофізичних досліджень параметри:
   - Питомий електричний опір зразків при обертах центрифуги 600 за хвилину:

$$\rho_n^{вод,ц} = \frac{R^{ц}}{\frac{1}{d} + \frac{4\ell}{3{,}14 \cdot d^2}},$$

де Rц – опір зразків при обертах центрифуги 600 за хвилину,
d – діаметр зразка,
l – довжина зразка.

   - Густину водонасичених порід: $\sigma_в = \frac{m_{вод}}{m_{вод} - m_{вод}^{гід}}$,

де $m_{вод}$ та $m_{вод}^{гід}$ - маси водонасиченого зразка, що зважений в атмосферних умовах та при гідростатичному зважуванні.

- Параметр пористості $P_п = \frac{\rho_п^{вод}}{\rho_{мін.вод}}$,

де $\rho_п^{вод}$ - питомий електричний опір водонасиченої породи,

$\rho_{мін.вод.}$ - питомий електричний опір мінералізованої води, який наведений в табл. 8.1.

- Параметр насичення $P_н = \frac{\rho_п^{вод,ц}}{\rho_п^{вод,н}}$,

де $\rho_п^{вод,ц}$ - питомий електричний опір водонасиченої породи при обертах центрифуги 600 за хвилину, $\rho_п^{вод,н}$ - питомий електричний опір водонасиченої породи в нормальних умовах.

3. Проаналізувати результати лабораторних робіт №№ 1-7 в комплексі з результатами з розрахованими в п.2 даними та петрографічним мікро- і макроописом.
4. Результати комплексного аналізу представити у табличній (приклад - таблиця 9.1) та текстовій формі, де відобразити взаємозв'язок петрофізичних і геологічних даних.

Таблиця 9.1
Приклад оформлення результатів досліджень

	швидкість, повзд. хвилі м/с		швидкість, поп. хвилі м/с	Пит опір, Ом м		Густина г/см^3.		Коефіцієнт пористості, %		Кз.в	Рн	Рп	Кпр
№ зразка	нас.	сух	сух	нас.	сух	нас.	сух	по воді	по газу	%	%	%	мД

10. Комплексна статистична обробка та інтерпретація даних петрофізики

Теоретична частина

Взаємозв'язок фізичних властивостей — це закономірне поєднання властивостей і зміна однієї властивості залежить, зазвичай, від зміни іншої. Знання взаємозв'язків між фізичними властивостями дозволяють за параметром, що легко вивчається, визначати інші параметри; за властивостями, визначеними в зразках – вивчати властивості порід в природному заляганні.

Більшість петрофізичних взаємозв'язків є кореляційними, це обумовлено, головним чином, неможливістю врахування усіх чинників, що впливають на досліджувані параметри.

Кореляція між властивостями не означає тільки залежності однієї властивості від іншої. У багатьох випадках взаємозв'язок існує в результаті залежності параметрів від чинників, що не розглядаються при дослідженнях, але що визначають величину цих параметрів. У елементах і мінералах такими чинниками є внутрішня будова речовини і зовнішні термодинамічні умови.

Кореляція між параметрами повинна спостерігатися при їх однотипній залежності від особливостей атомної будови речовини. Так, наприклад, основними чинниками, що визначають густину порід і швидкість поширення пружних хвиль в них, являються щільність упаковки атомів і атомна маса речовини. Зі збільшенням щільності упаковки атомів густина елементів і швидкість в них збільшуються. Зростання атомної маси призводить до зменшення швидкості і збільшення густини. Тому кореляція між параметрами σ *i V* має місце лише при зміні одного з чинників в порівнянні зі зміною іншого. Для елементів і мінералів в діапазоні зміни густини від 1000 до 3500— 4500 кг/м^3 варіації атомної маси менше варіацій щільності упаковки речовини. Цим обумовлена позитивна кореляція між σ *i* V. При σ > 4500 кг/м^3 зміни атомної маси перевищують зміни щільності упаковки атомів. В результаті між σ *i V* в елементах встановлюється негативна кореляція.

Прикладом позитивної кореляції параметрів може служити кореляція електропровідності і теплопровідності. Електропровідність і теплопровідність мінералів значною мірою визначаються типом кристалохімічного зв'язку. Високу електропровідність і теплопровідність мають мінерали з металевою, іонно-металевою і ковалентно-металевою

формою зв'язку. Ковалентні і іонні з'єднання є напівпровідниками і діелектриками; їх теплопровідність обумовлена гратчастою складовою.

У гірських породах встановлення взаємозв'язків між фізичними властивостями на основі внутрішньої будови мінералів ускладнене. Це можливо лише у разі, якщо властивості гірських порід адитивно обчислюються за властивостями мінералів, що складають породу. Проте фізичні властивості гірських порід визначаються не лише їх мінеральним складом, але і структурними та текстурними особливостями, типом заповнювача пустотного простору та інш. Отже, кореляція між параметрами в гірських породах повинна спостерігатися при їх залежності від одного з цих чинників при меншому впливі інших.

У породах з ущільненими текстурами, тобто у інтрузивних, метаморфічних, палеотипних ефузивних і ущільнених осадових утвореннях, мінеральний склад — основний чинник, що визначає більшість фізичних властивостей. Найбільша залежність від загального мінерального складу характерна для густини, у меншій мірі — для швидкості пружних хвиль і інших фізичних параметрів. У зв'язку з цим густина гірської породи може бути вичислена за густиною мінералів з незначною погрішністю, обумовленою недоврахуванням пористості. При обчисленні швидкості пружних хвиль ця погрішність зростає у зв'язку з впливом пористості і тріщинуватості на величину V. Залежність густини і швидкості пружних хвиль від мінерального складу таких порід підтверджується коефіцієнтом кореляції між σ і V_p, рівним 0,9. Існує велике число рівнянь зв'язку між швидкістю пружних хвиль і густиною гірських порід і мінералів, що відносяться до утворень I типу. Зазвичай цей зв'язок представляється у вигляді

$$V_p = a + b\,\sigma,$$

де a і b — коефіцієнти, що визначаються емпірично.

У породах з ущільненими текстурами теплопровідність залежить від мінерального складу і густини порід. Проте цей зв'язок менш чіткий завдяки впливу інших чинників.

У породах з пористими текстурами, представленими кайнотипними ефузивними і осадовими утвореннями, чинником, що має значний вплив на деякі фізичні властивості, є пористість. Для високопористих утворень характерна залежність густини, швидкості пружних хвиль, інтервального часу поширення пружних хвиль, теплопровідності, а для класу іонних провідників — і електропровідності від пористості порід. Це обумовлює у свою чергу закономірний зв'язок між цими параметрами.

Ряд фізичних властивостей (намагніченість, радіоактивність) не має загальної атомної природи або загальних геологічних чинників з іншими

властивостями. Прямий взаємозв'язок між ними відсутній, проте непрямий — можливий.

Існує у ряді випадків висока інформативність магнітних властивостей про закономірні зміни хімічного і мінерального складу і відповідно про густину геологічних утворень. Це обумовлено залежністю магнітної сприйнятливості від вмісту магнетиту, утворення якого пов'язане з умовами генезису порід. Така залежність відзначається, наприклад, для окремих фаз в межах єдиного інтрузивного комплексу.

У породах з пористими текстурами мінеральний склад не є основним чинником, що визначає фізичні властивості. Проте його вплив у ряді випадків – дуже істотний. Так, в осадових і ефузивних породах встановлюється взаємозалежність між густиною і швидкістю поздовжніх хвиль. Проте у зв'язку зі значним впливом пористості ця залежність менш чітка, чим для кристалічних утворень. В пористих породах велика кількість петрофізичних параметрів лінійно і нелінійно залежить від пористості, як відкритої, так і загальної. Це властивості, які в тій чи іншій мірі залежать від структури пустотного простору:

Об’ємна густина зменшується із збільшенням пористості завжди, а її значення не залежать від типу пористості, а тільки від концентрації пустот.

Швидкості поширення пружних хвиль зменшуються із збільшенням пористості, експериментально визначено залежності виду: $\nu = \frac{a}{K_п}$. Крім цього встановлено, що інтенсивність збільшується при наявності тріщинуватості. Встановлений різкий вплив типу пустотного простору та його упорядкованість на акустичну анізотропію зразків порід, при чому не тільки високо пористих, але й метаморфічних.

Питомий електричний опір порід залежить від пористості складним чином (має вплив тип пустотного наповнювача) – із зростанням пористості газонасиченої породи опір збільшується, а при водонасиченні – зменшується завдяки збільшенню провідних елементів. На основі електричних параметрів розраховується параметри пористості та насичення.

Параметр пористості обернено залежить від коефіцієнту пористості ($P_п = \left(\frac{1}{K_п^m}\right)$), а параметр насиченості – від коефіцієнта водонасиченості ($P_н = \left(\frac{1}{K_в^a}\right)$)

Магнітні властивості зменшуються завдяки немагнітності газової та рідкої фаз.

Залежність між пористістю та проникністю не завжди відтворює реальну сутність породи. Порода може мати високу пористість і дуже низьку проникність, або обернений випадок – висока проникність при низькій пористості. Незважаючи на цю фундаментальну відсутність однозначного зв'язку між цими двома властивостями, часто вдається побудувати досить корисні кореляційні залежності між ними. За емпіричними даними було встановлено, що є декілька функцій, які описують залежність між коефіцієнтом пористості та проникності. Вибір якоїсь з них залежить від петрофізичних та мінералогічних особливостей зразків та типу пустотного наповнювача (рис. 9.5). Самі залежності виглядають наступним чином:

$$K_{пр} = aK_n^b, \quad K_{пр} = a \cdot exp(b \cdot K_n), \quad K_{пр} = aK_n - b.$$

Загалом зазвичай при зростанні пористості зростає проникність, інтенсивність залежить від розміру зерен мінеральної матриці породи, розміру міжзернових пор, кількості та типу пустот. Якщо класифікувати для різних розміром зерен порід за графіки пористість-проникність, то виявляється досить стійкий зв'язок. Тобто, на отриманих графіках кожна вибірка, для якої спостерігається кореляція пористість-проникність, характеризується певним розміром зерен породи, і за Крейзом, чим більше кут нахилу прямої, якою апроксимують цю залежність (на білогарифмічному бланку), тим більший розмір зерен характерний для зразків, тобто, коли структура змінюється від дрібнозернистої до крупнозернистої, проникність при тій самій пористості зростає.

Завдання:

1. Вивчити петрографічний опис колекції зразків однієї літологічної групи свердловин завданої площі
2. Вивчити результати петрофізичних досліджень в нормальних умовах для колекції зразків.
3. Побудувати крос-плоти параметрів, зокрема:
   $\Delta T = f(K_п)$,
   $\rho_п = f(K_п)$,
   $P_п = f(K_п)$,
   $P_н = f(K_п)$,
   $\sigma = f(K_п)$
   $K_п = f(K_{пр})$,

4. Апроксимувати функціями отримані залежності (приклад див. на рис. 10.1)

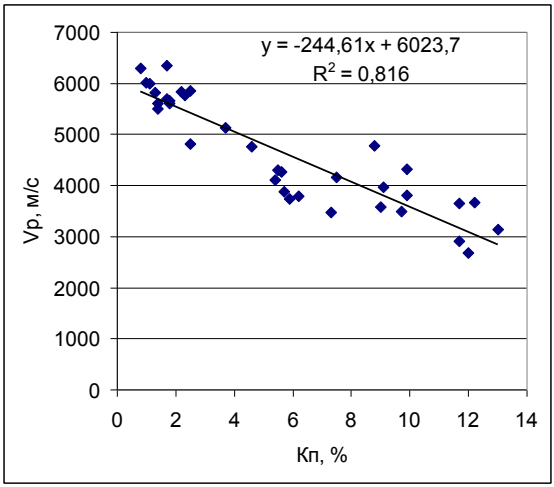

Рис. 10.1 Приклад залежності швидкості повздовжніх хвиль від пористості для колекції карбонатних зразків Іванівської площі

5. Виділити за петрофізичними залежностями окремі групи порід, обґрунтувати це.
6. Описати результати досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1984, –456 с.
2. Добрынин В.М., Вельденштейн Ю.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
3. Кобранова В.М. Петрофизика. – М.: Недра, 1986. – 392 с.
4. Петрофізика – Справочник. В трех книгах. / Под редакцией Н.Б.Дортман – М., Недра, 1991. – 391 с.
5. Хамидуллина Г.С. Петрофизика: пособие для самостоятельного изучения лекционного курса слушателей повышения квалификации специальности «Геофизика». – Казань: Казанский государственный университет, 2009. 90 с.
6. Толстой М.І., Рева М.В., Степанюк В.П., Сухорада А.В., Гожик А.П. Загальний курс геофізичних методів розвідки: Підручник для вузів. 590 с
7. Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г. Петрофизика. Учебник для ВУЗов.– Томск.– Изд-во Томского ун–та, 1997. – 462 с.
8. Нестеренко М. Ю. Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів. – Київ, 2005. – 224 с.
9. Продайвода Г.Т., Безродний Д.А. Акустичний текстурний аналіз. /ВПЦ «Київ. ун-т», 2011, 365 с. – Гл. 5.
10. Виноградов В.Г., Дахнов А.В., Пацевич С.Л., Практикум по петрофизике. Учебное пособие для ВУЗов.– М.: Наука, 1990. –227 с.
11. Кобранова В.М., Пацевич С.Л., Дахнов А.В., Извеков Б.И. Руководство к лабораторным работам по курсу «Петрофизика». – М.: Недра, 1982. – 216 с.
12. Справочник физических констант горных пород. – М., 1969. – 541 с.
13. Рудько Г., Нестеренко М. та інш. Обгрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметров теригенних пород-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. – Київ-Львів, 2005. - 58с.
14. Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: Уч.пос. для студ. Вузов. М. – Тверь: Изд. АИС, 2005.