

УДК 550.552.53.553

© С.А. Вижва, І.М. Безродна, Д.А. Безродний, 2010

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
м. Київ*

ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ НАСИЧЕННЯ ПУСТОТНОГО ПРОСТОРУ КАРБОНАТНИХ ПОРІД НА ПАРАМЕТРИ ПРУЖНОЇ АНІЗОТРОПІЇ

Проведений аналіз параметрів пружної анізотропії колекції зразків вапняків Ново-Миколаївської площі Дніпровсько-Донецької западини в залежності від їх флюїдного стану. Встановлено зв'язок коефіцієнтів пружної анізотропії, індикаційних поверхонь пружних хвиль з наявністю та орієнтацією систем мікро- та макротріщинуватості, структурою пустотного простору.

Ключові слова: параметри пружної анізотропії, вплив характеру насичення, петрофізичні дослідження.

Вступ. Однією з найбільш актуальних задач сучасної геофізики є визначення структури пустотного простору складнопобудованих порід – колекторів нафти і газу, зокрема – карбонатних колекторів. В зв'язку зі значним впливом мікро- та макротріщинуватості та параметрів насичення пустотного простору на акустичні, пружні, термпружні, фільтраційні й ємнісні характеристики середовища їх необхідно враховувати, будуючи залежність між ємнісно-фільтраційними і петрофізичними та геофізичними характеристиками.

Наявність орієнтованих неоднорідностей, систем тріщинуватості, акустопружних ефектів може привести до виникнення акустичної і пружної анізотропії. Саме параметри анізотропії можуть бути індикаторами напружено-деформованого стану та наявності систем орієнтованих неоднорідностей. Ці параметри по різному проявляються під час заповнення пустотного простору газами чи флюїдами.

Метою роботи є вивчення та аналіз параметрів пружної анізотропії в залежності від флюїдного стану вапняків Ново-Миколаївської площі Дніпровсько-Донецької западини, на прикладі колекції зразків.

Методи дослідження акустичної та пружної анізотропії. Для вимірювання пружних характеристик гірських порід застосовують дві групи методів – статичні та динамічні.

Статичні методи використовують передовсім для визначення пружних модулів. Їх спільною особливістю є пряме вимірювання деформацій

зразків тензометрами. Оскільки реальне геологічне середовище не є ні ідеально-пружним, ні ізотропним, такі методики не можуть бути ефективно застосовані з метою оцінки пружних властивостей гірських порід. Тому при геофізичних дослідженнях, речовинно-фізичному і структурному моделюванні найчастіше застосовують динамічні методи визначення пружних характеристик, що дозволяють фіксувати час проходження пружної хвилі через зразок, та параметри її затухання.

Динамічні методи вимірювань розрізняють за способами збудження пружних коливань: *динамічний резонансний* метод, де використовують стоячі хвилі, збуджувані зовнішнім джерелом; метод *пластини*, що обертається на шляху безперервної пружної хвилі; методи *послідовних ультразвукових імпульсів*, у т.ч. *лазерний*; методи реєстрації хвиль пружності (*першого вступу, фазовий, резонансний* тощо).

Основні методи експериментальних ультразвукових досліджень пружної анізотропії гірських порід, зокрема *ортогональних напрямків, сфери, акустополаризаційний, особливих напрямків* [1–4], дають можливість виявити і оцінити пружну анізотропію, а в залежності від обраного методу ще й визначати детальний просторовий розподіл швидкостей квазіповздовжних і квазіпоперечних хвиль, число і просторову орієнтацію елементів пружної симетрії пружних середовищ. До основних недоліків цих методів слід віднести неможливість кількісно оцінити регулярну і флуктуаційну складові ефективної фазової швидкості пружної хвилі, що забезпечує розрізнення ефектів анізотропії неоднорідностей та можливість визначення акустичної і пружної симетрії текстури гірських порід за відсутності апріорної інформації та довільній орієнтації лабораторної системи координат [5].

Для вивчення пружної анізотропії текстур гірських порід і вирішення пов'язаних з нею геологічних задач найбільш ефективним є розроблений на кафедрі геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка *акустичний інваріантно-поларизаційний метод* [4–6].

За наявності багатопланових методів і методик петроакустичних досліджень проблема впливу насичення на параметри анізотропії пружних хвиль залишилася невивченою, досліджений лише вплив насичення на швидкість пружних хвиль деяких типів гірських порід [6, 7].

Методика. Для вимірювання фазової швидкості застосовано імпульсно-фазовий ультразвуковий метод, який забезпечує вимірювання фазової швидкості і визначення напрямків векторів поляризації квазіповздовжних і квазіпоперечних пружних хвиль із ортогональними векторами поляризації.

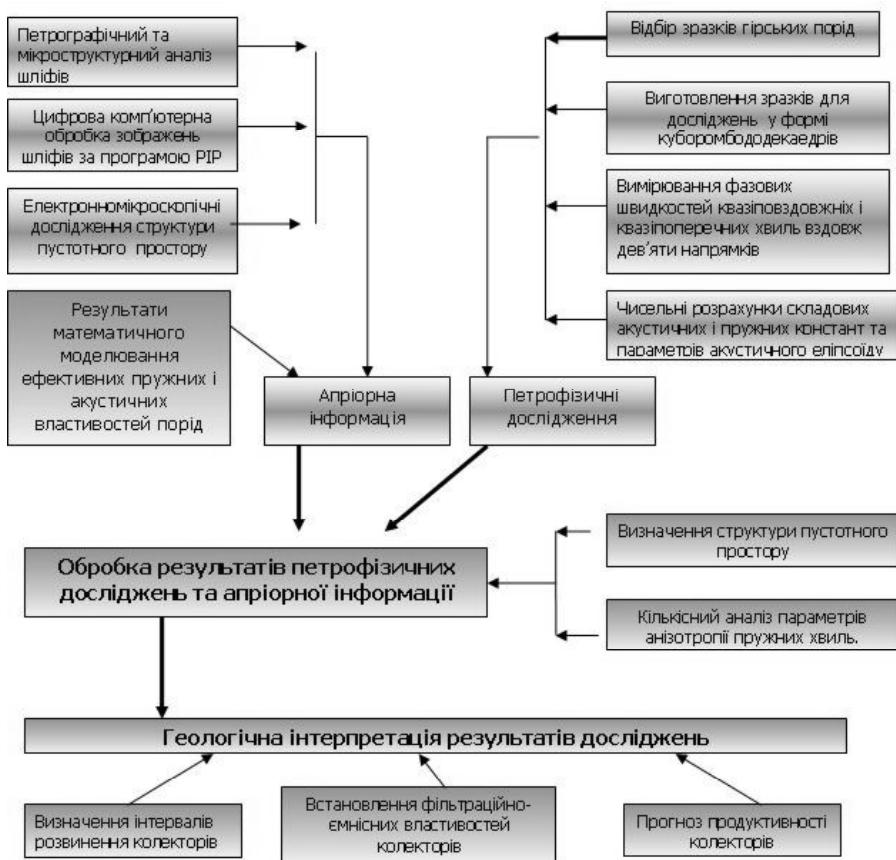


Рис. 1. Блок-схема методики ультразвукових вимірювань та обробки результатів

Визначення напрямків поляризації хвиль здійснювали спеціальним теодолітним пристроєм, що забезпечує обертання зразка відносно співвісно розташованих випромінювача і приймача лінійно-поляризованих хвиль. Вимірювання здійснювали у частотному діапазоні 0,6–0,7 МГц для квазіповздовжніх хвиль і 0,4–0,6 МГц – для квазіпоперечних [4–6, 8, 9].

Відповідно до методики досліджень (рис. 1) на першому етапі виготовляється зразок у формі куба із зрізаними ребрами – куборомбодекаедр. Вимірюються швидкості розповсюдження квазіповздовжніх V_p і двох квазіпоперечних V_s хвиль різної поляризації в кожному з дев'яти напрямків. Великою перевагою використаного методу є можливість отримання повного набору пружних постійних для середовищ

будь-якої симетрії, які, в свою чергу, дають повну характеристику пружної анізотропії середовища, дозволяють обчислювати значення швидкості повздовжних і поперечних хвиль для довільного напрямку в середовищі.

За результатами експериментальних досліджень фазових швидкостей об’ємних пружних хвиль визначається набір параметрів анізотропії [4–6, 8, 9] (рис. 1), зокрема інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії A_{μ} ; параметри акустичної лінійності і сланцюватості L_{μ} та S_{μ} ; акустична текстура зразка; симетрія акустичного тензора; параметри азімутальної анізотропії пружних хвиль. Останні представлені стереоексципіями ізоліній поверхонь фазової швидкості квазіповздовжної хвилі; різниці між “швидкою” і “повільною” квазіпоперечними хвилями; кутом відхилення вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі; диференціальним коефіцієнтом пружної анізотропії.

Коефіцієнт диференціальної відносної середньоквадратичної пружної анізотропії визначали за формулою:

$$A_{(d)} = \sqrt{F_{\min} / (\Lambda^2)_c} \cdot 100 \%,$$

де $F_{\min} = (\Lambda^2)_c - (\Lambda^{02})_c$, $(\Lambda^2)_c$ і $(\Lambda^{02})_c$ – відповідно приведені тензори Крістофеля для анізотропного середовища і найближчого до нього ізотропного середовища, причому

$$(\Lambda^2)_c = \Lambda_{11}^2 + \Lambda_{22}^2 + \Lambda_{33}^2 + 2(\Lambda_{12}^2 + \Lambda_{13}^2 + \Lambda_{23}^2).$$

Інтегральний коефіцієнт акустичної анізотропії визначали за формулою:

$$A_{\mu} = \sqrt{\frac{F_{\min}^{(\mu)}}{(\mu_{ii}^2)_c}} \cdot 100 \%,$$

де $(\mu_{ii}^2) = \mu_{11}^2 + \mu_{22}^2 + \mu_{33}^2$; $\mu_{11}^2, \mu_{22}^2, \mu_{33}^2$ – власні значення акустичного тензора.

Параметри акустичної лінійності L_a і сланцюватості S_a , розраховані за допомогою власних значень акустичного тензора, характеризують параметри акустичного еліпсоїда:

$$L_a = \frac{\mu_q}{\mu_m}; S_a = \frac{\mu_m}{\mu_p},$$

де μ_q, μ_m, μ_p – найбільше, проміжне і найменше значення акустичного тензора [4–6, 8, 9].

Обчислення урівноважених швидкостей об’ємних пружних хвиль, значень акустичного тензора в робочій системі координат, власних значень, їх довірчих границь і власних напрямків детермінованої складової акустичного тензора зразків порід, початкових наближень для пружних постійних здійснено за допомогою програми, що використовує дані експериментальних вимірювань фазових швидкостей квазіповздовжної, “повільної” та “швидкої” квазіпоперечних хвиль та густину зразка, що вимірюється. За результатами розрахунків було визначено параметри акустичної лінійності L_a і сланцоватості S_a , а також тип симетрії текстури акустичного тензора в стандартній акустичній системі координат.

Розрахунок пружних постійних порід було проведено з використанням програми, де як вихідні дані використано значення урівноважених швидкостей квазіповздовжної і квазіпоперечних хвиль, акустичних констант і початкових наближень пружних постійних. За результатами обчислень для кожного зразка було розраховано матрицю ефективних пружних постійних з урахуванням флуктуаційної складової та здійснено перевірку гіпотези значимості відхилення пружних постійних від нуля. Ці дані дали можливість оцінити азимутальну пружну анізотропію вибраних зразків вапняків.

Результати досліджень. Авторами проведені вимірювання сухих і насичених мінералізованою водою 8 зразків одного віку зі свердловин Ново-Миколаївської площі ДДЗ. Розглянуті вапняки представлені такими літологічними типами: органогенно-детритовий тріщинуватий, брекчієвидний тріщинуватий, хемогенний і шламовий з тріщинами, орієнтованими вздовж шаруватості, однонаправленими і перпендикулярними до осі керну, тріщинно-кавернозними із різноорієнтованими тріщинами.

У мікроструктурі та пустотному просторі зразків за результатами електронномікроскопічних досліджень встановлені деякі особливості. Зокрема, в щільних хемогенних вапняках (ПО-26) первинні пустоти ізольовані одна від одної; у брекчієподібних щільних (ПО-27) вапняках присутні скупчення дрібних пор та прямолінійних тріщин; кавернозно-тріщинуваті вапняки (ПО-28) характеризуються тріщинуватістю, зконцентрованою навколо уламків вапняку, каверни утворені в зонах первинної тріщинуватості у процесі перекристалізації порід. Загалом, щільність епігенетичних тріщин та їх розкритість значно змінюються у зразках, але це не призводить до збільшення пористості і проникності.

За результатами проведеного аналізу значень швидкості квазіповздовжних і квазіпоперечних хвиль встановлено неоднорідність мінеральної структури і пустотного простору зразків порід. Напрямки, де швидкість

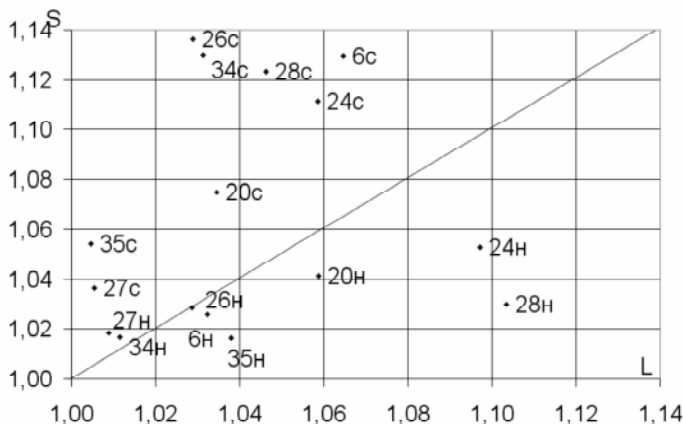


Рис. 2. Діаграма параметрів акустичного еліпсоїду текстур сухих і насичених зразків вапняків свердловин Ново-Миколаївської площі (цифрами позначені номери зразків)

повздожньої хвилі (V_p) зростає відповідно до насичення зразків, характеризуються тріщинуватістю (вони присутні у всіх зразках колекції), а зменшення значень V_p за тих же умов – кавернозністю (зр. ПО-28). За проведеним аналізом параметрів акустичного еліпсоїда та акустичної анізотропії сухих і насичених зразків встановлено:

- 1) симетрія текстури акустичного тензора сухих і насичених зразків вапняків виявилася текстур із симетрією вище поперечно-ізотропної не виявлено;
- 2) планальною симетрією характеризуються сухих зразків: 100 % насичених зразків; 75 % аксіальною і 25 % планальною симетрією (рис. 2);
- 3) за інтегральним коефіцієнтом акустичної анізотропії (таблиця) 62,5 % зразків виявилися середньоанізотропними ($A_\mu < 10\%$), 25 % – низькоанізотропними, лише зр. ПО-6 можна характеризувати як високоанізотропний. Насичення зразків суттєво впливає на значення параметра A_μ – він зменшується для всіх досліджених зразків. Відношення $A_{\mu \text{ сух}}/A_{\mu \text{ нас}}$ змінюється від 1,11 (зр. ПО-24 – щільний, зрідка тріщинуватий) до 4,44 (зр. ПО-34 – смугастість і тріщинуватість перпендикулярна до вісі свердловини). Загалом, сухі та насичені зразки характеризуються низькою упорядкованістю елементів текстури.

За результатами визначення регулярної складової ефективного акустичного тензора і інтегрального коефіцієнта акустичної анізотропії представлені зразки виявилися акустично анізотропними.

Параметри акустичної анізотропії зразків вапняків із свердловин Ново-Миколаївської площі

Номер зразка*	Інтервал відбору зразка (номер свердловини)	Власні значення акустичного тензора			Коефіцієнт акустичної анізотропії, A_{μ} , %	L_{μ}	S_{μ}
		μ_{11}	μ_{22}	μ_{33}			
ПО-6с	3770-3772 (20)	41,05	36,35	43,70	13,30	1,06	1,13
ПО-6н		55,27	47,98	52,93	5,83	1,04	1,10
ПО-20с	2407-2419 (27)	38,68	34,78	37,39	7,51	1,03	1,08
ПО-20н		54,25	51,24	49,21	4,01	1,06	1,04
ПО-24с	2578-2586 (28)	39,78	37,58	33,81	6,64	1,06	1,11
ПО-24н		39,19	35,72	33,93	6,00	1,10	1,05
ПО-26с	2369-2384 (28)	64,90	55,51	63,08	6,63	1,03	1,14
ПО-26н		61,98	58,57	61,25	2,42	1,01	1,05
ПО-27с	2281-2291 (33)	53,62	53,33	51,45	2,63	1,01	1,04
ПО-27н		59,58	57,99	59,55	1,26	1,01	1,03
ПО-28с	2314-2323 (33)	33,99	28,92	32,49	6,67	1,05	1,12
ПО-28н		32,34	28,46	29,31	5,54	1,10	1,03
ПО-34с	2530-2541 (35)	49,84	51,40	45,50	5,10	1,03	1,13
ПО-34н		46,85	46,08	47,39	1,15	1,01	1,02
ПО-35с	2552-2555 (35)	62,27	61,98	58,80	2,58	1,01	1,05
ПО-35н		57,55	54,54	55,44	2,26	1,04	1,02

с – сухий зразок, н – насичений.

Визначення повного набору компонентів матриць ефективних пружних постійних забезпечило визначення параметрів азимутальної анізотропії пружних хвиль для досліджених зразків. Аналіз матриць ефективних пружних постійних показав, що пружна симетрія текстур вивчених порід виявилася не вищою від ромбічної, переважно триклінною, пружні текстури вищих порядків не виявлені.

При насиченні у більшості зразків закономірностей у зміні пружних постійних не встановлено (приклад на рис. 3, а – зр. ПО-26). Але у трьох зразках, що мають направлену тріщинуватість з дрібними тріщинами (ПО-6, ПО-20, ПО-27), виявлено збільшення значень постійних C^*_{11} , C^*_{22} , C^*_{33} , C^*_{12} , C^*_{13} , C^*_{23} , C^*_{24} (рис. 3, б), що характеризує наявність голкоподібних тріщин розміром 10^{-3} – 10^{-4} [6].

Аналізуючи стереопроєкції параметрів пружної анізотропії, можна характеризувати і анізотропність порід, при цьому зміна всіх вивчених параметрів у різних напрямках є надзвичайно складною, стереопроєкції мають багато екстремальних точок, а мінімальні і максимальні значення змінюються в широких межах.

Швидкість повздовжної хвилі у тріщинуватих зразках внаслідок їх насичення збільшується. Чим більше розвинута тріщинуватість, тим ця

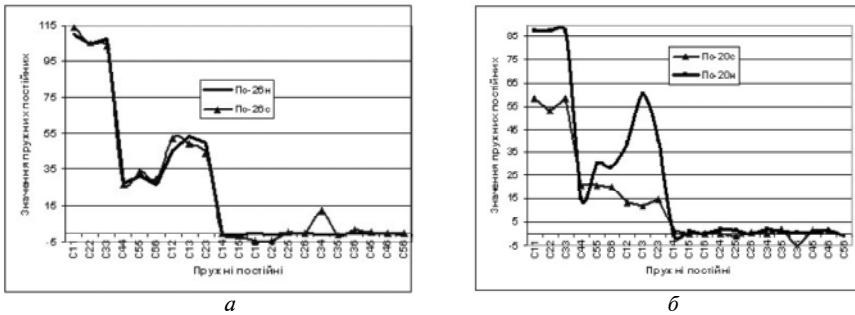


Рис. 3. Зміна пружних постійних для сухих і насичених зразків вапняків: а – ПО-26; б – ПО-20

різниця більша (рис. 4, а, б). Наприклад, для зразка ПО-27 в сухому стані V_p змінюється відповідно від 4,9 до 6,3, а в насиченому – від 5,8 до 6,35 км/с; для зразка ПО-24 в сухому стані – від 4 до 5, в насиченому – від 4,5 до 6 км/с; для ПО-20 відповідно від 4,0 до 4,7 та від 5,75 до 6,1 км/с. Кавернозність вапняків при насиченні впливає на зміну швидкостей значно менше.

Диференціальний (A_d) коефіцієнт анізотропії, як і інтегральний A_{μ} , зменшується через насичення зразків – у середньому в 5,7 (рис. 4 д, е) (мінімальне значення $A_d^{\text{сух}} / A_d^{\text{нас}}$ для щільного дрібнозернистого зразка ПО-34 складає 2,22, а максимальне встановлено для різнозернистого грудкуватого вапняку з дрібними орієнтованими тріщинами у зр. ПО-27 і склало 10,25. Під час дослідження A_d у багатьох зразках, особливо насичених, виявлено напрямки, по яких коефіцієнти анізотропії набувають нульового значення. Ці напрямки в сухих і насичених зразках не завжди співпадають, що свідчить про визначальну роль тріщинуватості у дослідженні пружної анізотропії.

На стереопроєкціях ізоліній вказівних поверхонь різниць між “швидкою” та “повільною” квазіпоперечними хвилями (рис. 4, в, з) видно, що інтенсивність розщеплення хвиль ($\Delta V_s = V_{s1} - V_{s2}$) складно змінюється в різних напрямках. Це свідчить про наявність різних систем тріщин, які мають різну деформаційну природу (тріщини зсуву та тріщини відриву) і різну природу їх формування (первинна та вторинна тріщинуватість). Насичення зразків призводить до зменшення їх анізотропності. Відношення ΔV_s для сухих і насичених зразків набув значення від 2 для зр. ПО-20 до 16 для зр. ПО-24). Майже в усіх зразках колекції присутні напрямки ізотропності порід, де значення $\Delta V_s = 0$, причому у насичених їх набагато більше, особливо у зр. ПО-6, ПО-28, ПО-34, ПО-35.

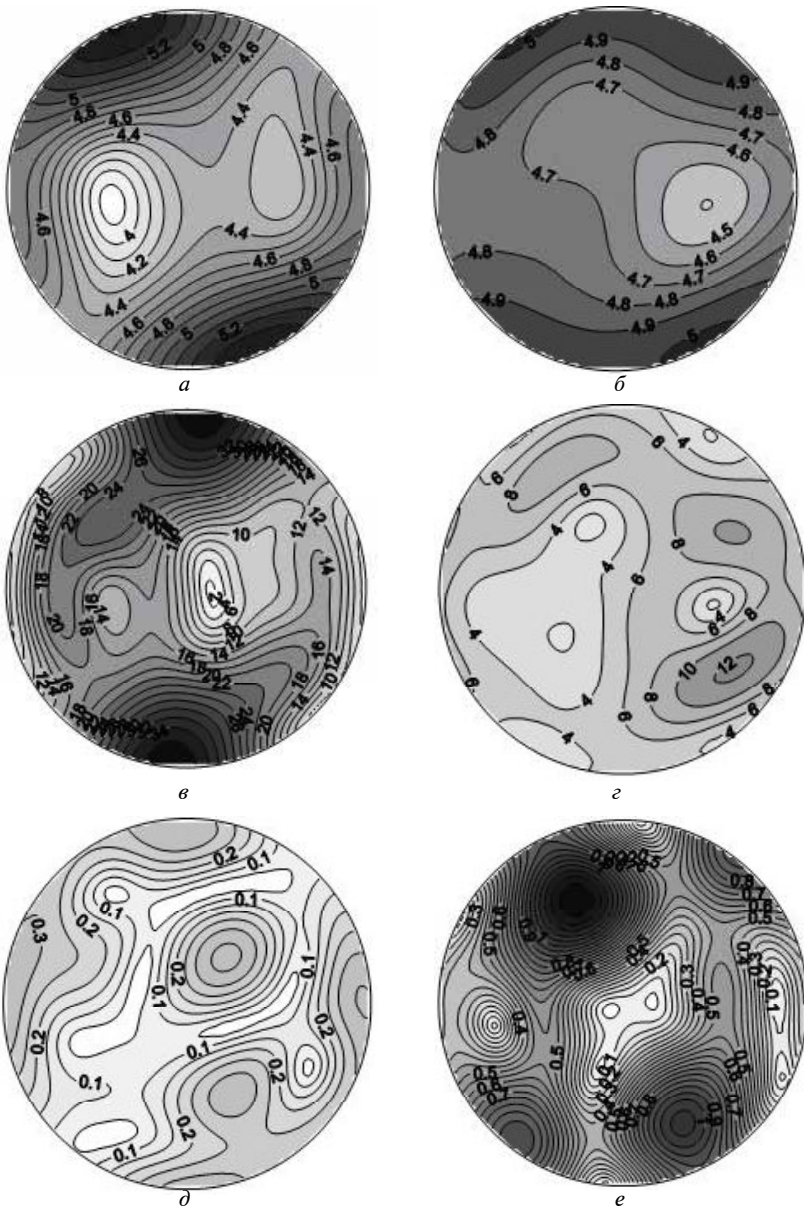


Рис. 4. Стереопроєкції ізоліній вказівних поверхонь параметрів азимутальної анізотропії пружних хвиль зразка ПО-24 в сухому (а, в, д) і насиченому (б, з, е) стані: а, б – швидкості повздовжніх хвиль, км/с; в, з – різниця між “швидкою” і “повільною” квазіпоперечними хвилями, км/с; д, е – диференціальні коефіцієнти анізотропії, %

Висновки. Проведені дослідження анізотропії акустичних і пружних характеристик складнобудованих карбонатних порід у різних станах насичення показують високу її інформативність. Встановлено, що:

- всі сухі зразки характеризуються планальною симетрією текстур акустичного тензора, що підкреслює їх формування в умовах літостатичного стиснення; насиченим зразкам властива аксіальна симетрія;
- кількість екстремумів у стереопроєкціях вказівних поверхонь квазіповздовжних хвиль внаслідок насичення зразків зменшується, що пов'язано із зменшенням їх анізотропності;
- розщеплення квазіпоперечних хвиль значно зменшується для насичених зразків у порівнянні з сухими;
- напрямки, за якими порода набуває властивостей майже ізотропного середовища, існують у всіх зразках, але їх істотно більше у насичених;
- через насичення всіх досліджених вапняків інтегральний і диференціальний коефіцієнти акустичної і пружної анізотропії зменшуються.

Встановлено зв'язок індикаційних поверхонь пружних хвиль, коефіцієнтів пружної анізотропії із наявністю та орієнтацією систем мікротамакротріщинуватості, структурою пустотного простору. Ці особливості необхідно враховувати під час побудови математичних моделей для інтерпретації матеріалів ГДС та петрофізики.

1. *Прос З.* Изучение анизотропии упругих свойств горных пород при всесторонних давлениях на шаровых образцах // Исследования физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах – К: Наук. думка, 1977. – С. 56–67.
2. *Горбацевич Ф.Ф.* Акустополарископия горных пород. – Апатиты: КНЦ РАН, 1995. – 204 с.
3. *Александров К.С.* Анизотропия упругих свойств горных пород // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1968. – № 6. – С. 17–28.
4. *Продайвода Г.Т.* Инвариантно-поляризационный акустический метод определения упругих постоянных горных пород // Геофиз. журн. – 1998. – **20**, № 6. – С. 83–95.
5. *Безродний Д.А.* Пружна анізотропія метаморфічних порід Кривбасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу. – Дис. ... кандид. геол. н. за спец. 04.00.22 – Геофізика. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – К., 2008.
6. *Александров К.С.* Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2000. – 354 с.
7. *Горбацевич Ф.Ф., Ильченко В.Л.* Влияние насыщения жидкостью микропор образцов анизотропных горных пород на их акустические свойства // Дефектоскопия. – № 4. – 1995. – С. 6–15.

8. *Продайвода Г.Т., Свиридов А.В., Лахтанов В.Т., Выжва С.А.* Ультразвуковая аппаратура для исследования анизотропии горных пород // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1987. – № 5. – С. 97–102.
9. *Продайвода Г.Т., Безродний Д.А., Безродна І.М., Кожан О.М.* Пружна симетрія і параметри анизотропії метаморфічних порід Криворізької надглибокої свердловини // Вісник Київськ. ун-ту, Геологія. – 2001. – № 24. – С. 91–95.

Влияние характера насыщения пустотного пространства карбонатных пород на параметры упругой анизотропии С.А. Выжва, И.М. Безродная, Д.А. Безродный

РЕЗЮМЕ. Проведен анализ параметров упругой анизотропии коллекции образцов извєтсняков Ново-Николаевской площади Днепровско-Донецкой впадины в зависимости от их флюидного состояния. Установлено связь коэффициентов упругой анизотропии, индикационных поверхностей упругих волн с наличием и ориентацией систем микро- и макротрещин, структурой пустотного пространства.

Ключевые слова: параметры упругой анизотропии, влияние характера насыщения, петрофизические исследования.

The influence of the saturation character of the empty space of carbonate rocks on the parametres of elastic anysotrophy S.A. Vygva, I.M. Bezrodna, D.A. Bezrodniy

SUMMARY. Analysis of parameters of elastic anisotropy of collection of standards of limestone's Novo-Mykolaivska area of Dnipro-Donetsk depression depending on their fluid state is carried out. Connection of coefficients of elastic anisotropy, indication surfaces of resilient waves with a presence and orientation of the systems mikro- and makrocraccks, by the structure of emptiness space is set.

Keywords: parameter elastic anisotropy, influence of character fluid saturation, petrophysical research.