

УДК 550.34.013.4

І. Безродна, канд. геол. наук

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ТРІЩИН І КАВЕРН НА АНІЗОТРОПІЮ ПРУЖНИХ І АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КАРБОНАТНИХ КОЛЕКТОРІВ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Г.Т. Продайводою)

Розглядаються результати математичного моделювання ефективних пружних постійних і акустичних властивостей карбонатних колекторів із різними системами орієнтації тріщин і каверн. Розраховано вплив пустотного простору на значення швидкостей пружних хвиль, інтегральних та диференціальних коефіцієнтів анізотропії. Показано, що вони суттєво відрізняються для моделей із однією, двома та трьома системами орієнтації пустот.

The results of mathematical modelling of effective elastic constants and acoustic properties of carbonate reservoirs with different systems of crack and cavern orientation are examined. Pore space influence on the value of velocity of elastic waves, integral and differential coefficients of anisotropy are calculated. Their substantially difference for models with one, two and three orientation emptiness is shown.

Вступ. Математичне моделювання ефективних пружних і акустичних властивостей складнобудованих порід-колекторів можливе лише при застосуванні більш досконалих моделей, які б адекватно відображали їх властивості і структуру, а також деформаційні процеси, що в них відбуваються.

Постановка проблеми. Для кількісної оцінки впливу пустотного простору на ефективні пружні постійні і акустичні властивості складнобудованих порід-колекторів застосовуються методи теорії механіки стохастичного середовища [1-7]. Існує ряд наближених методів розв'язку цієї задачі, що дозволяють розраховувати ефективні геофізичні параметри реального геологічного середовища з певним наближенням. Найпростішими із них є методи усереднення властивостей по макрооб'єму, які відомі як методи Фойгта і Реусса. Вони дають відповідну верхню і нижню межу можливих значень ефективних геофізичних параметрів. Ця межа може бути надзвичайно широкою. Побудову більш вузької межі можна здійснити, якщо скористатися варіаційним методом (методом Хашіна-Штрікмана) [4]. До найбільш відомих методів, які дозволяють покращити наближення ефективних геофізичних параметрів можна віднести методи регуляризації структури, методи стохастичних диференціальних рівнянь, методи варіального розвинення і самоузгодження, метод умовних моментів [4]. Метод варіального розвинення ґрунтується на припущенні, згідно якому напружено-деформований стан пружного тіла, з множиною взаємодіючих неоднорідностей, можна розглядати у вигляді суми простих взаємодій з подальшим ускладненням характеру взаємодії між ними. Метод самоузгодження базується на заміні реальної взаємодії багаточисленних структурних елементів між собою взаємодією кожного структурного елемента з оточуючою його матрицею, яка має невідомі ефективні постійні.

Найбільші можливості при практичній реалізації мають методи, які базуються на теорії випадкових полів [4, 6, 8]. Тензорні поля геофізичних параметрів реального геологічного середовища і характеристики його напружено-деформованого стану представляють собою випадкові поля. Тому задачу визначення ефективних пружних постійних можна звести до розв'язку стохастичних рівнянь рівноваги. Такий підхід дозволяє розраховувати ефективні пружні властивості моделей, максимально наближених до реальних структур реального геологічного середовища з довільними властивостями структурних елементів і без будь-яких обмежень на їх концентрацію.

Метою роботи є аналіз впливу тріщинуватості із різними системами орієнтації тріщин і каверн на ефективні пружні постійні і акустичні властивості карбонатних колекторів.

При математичному моделюванні для вирішення поставленої задачі використовувалася *метод умовних моментних функцій* із застосуванням розрахункової схеми Морі-Танака [7-9].

Особливо великі зміни параметрів анізотропії об'ємних пружних хвиль спостерігаються в складнобудованих карбонатних колекторах. Для чисельних розрахунків ефективних фазових швидкостей пружних хвиль в анізотропних колекторах використовується рівняння Гріна-Крістоффеля [8]:

$$(\Gamma_{ij}^* - \rho^* v^* \delta_{ij}) < U_i > = 0 \quad (1)$$

де $\Gamma_{ij}^* = C^*_{ijkl} n_j n_k$ – тензор Крістоффеля; C^*_{ijkl} – ефективні пружні постійні анізотропного карбонатного колектора; v^* – ефективна фазова швидкість; n_j – компоненти вектора хвильової нормалі; ρ^* – щільність; $< U_i >$ – вектор пружних зміщень; δ_{ij} – тензор Кронекера.

Для розв'язку задачі знаходження анізотропних параметрів середовища довільної симетрії використовується модифікований метод Якобі [96]. В цьому методі задача обчислення значень фазових швидкостей та векторів пружних зміщень, якщо відомий приведений ефективний тензор пружних постійних, зводиться до знаходження власних векторів і власних значень тензору Крістоффеля $\Lambda^*_{ij} = C^*_{ijkl} n_j n_k / \rho^*$.

Тобто необхідно знайти таку систему координат, в якій тензорна матриця Крістоффеля діагональна. Для цього вводять допоміжну повернуту систему координат x_i вісь x_3 якої співпадає з напрямком вектору хвильової нормалі \vec{n} .

Орієнтація двох інших осей не має принципового значення. Формула перетворення, що забезпечує перехід від робочої системи координат x_j до власної системи координат x_i має вигляд:

$$x_i = N_{ij} x_j, \quad (2)$$

де матриця перетворення N_{ij} виражається через тригонометричні функції кутів сферичної системи координат:

$$N_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \theta & \cos \varphi \sin \theta & -\sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \sin \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де θ – азимутальний кут, φ – полярний кут сферичної системи координат.

Тоді можна записати формулу перетворення приведенного тензору Крістоффеля до допоміжної системи координат:

$$\Gamma_{ij} = N_{ip} N_{jq} \Lambda^*_{pq}. \quad (4)$$

Шукають матрицю A_{ij} , яка приведе тензорну матрицю Γ_{ij} до діагонального вигляду:

$$\Gamma'_{ij} = A_{ip} A_{jq} \Gamma_{pq} = \delta_{ij} \lambda. \quad (5)$$

Вона визначається з умови, згідно якій враховується, яка з недиагональних компонент матриці Γ_{ij} є максимальною. Якщо, наприклад, максимальним є діагональна компонента матриці Γ_{12} , то обертання навколо осі x_3 здійснюють за допомогою матриці:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\text{де } \psi = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\delta_{12}}{\delta_{22} - \delta_{11}}.$$

Величина кута ψ визначається на кожному кроці ітерації в залежності від того, навколо якої осі координат здійснюється обертання системи координат.

Це приводить до явного вигляду першого наближення для фазових швидкостей:

$$\langle v_{qp} \rangle^2 = g^2 \Gamma_{11} + h^2 \Gamma_{22} + \Gamma_{33} + 2gh\Gamma_{12} + 2g\Gamma_{13} + 2h\Gamma_{23}, \quad (7)$$

$$\langle v_{qs}^{(1)} \rangle^2 = (\Gamma_{11} - 2g\Gamma_{13} + g^2\Gamma_{33}) \cos^2 \varphi + (\Gamma_{22} - 2h\Gamma_{23} + h^2\Gamma_{33}) \sin^2 \varphi + (h\Gamma_{13} + g\Gamma_{23} - gh\Gamma_{33} - \Gamma_{12}) \sin 2\varphi, \quad (8)$$

$$\langle v_{qs}^{(2)} \rangle^2 = (\Gamma_{22} - 2h\Gamma_{23} + h^2\Gamma_{33}) \cos^2 \varphi + (\Gamma_{11} - 2g\Gamma_{13} + g^2\Gamma_{33}) \sin^2 \varphi + (h\Gamma_{13} + g\Gamma_{23} - gh\Gamma_{33} - \Gamma_{12}) \sin 2\varphi, \quad (9)$$

де

$$g = (\Gamma_{23}\Gamma_{12} - \Gamma_{13}(\Gamma_{22} - \Gamma_{33}))/\Gamma_{12}, \quad h = (\Gamma_{13}\Gamma_{12} - \Gamma_{23}(\Gamma_{11} - \Gamma_{33}))/\Gamma_{12}, \quad (10)$$

$$\Gamma_0 = (\Gamma_{11} - \Gamma_{33})(\Gamma_{22} - \Gamma_{33}) - \Gamma_{12}^2.$$

Вектор пружних зміщень в допоміжній системі координат

$$\langle U_i^{(V)} \rangle = A_{vi}, \quad (11)$$

а в робочій системі координат

$$\langle U_i^{(V)} \rangle = A_{vp} N_{pi} \quad (12)$$

Тут $v = 3$ відповідає квазіповздовжній хвилі, а $v = 1, 2$ - квазіпоперечним.

Якщо точність першого наближення недостатня, ітераційний процес продовжується. Обертання здійснюється, виходячи із компонент одержаної матриці Γ'_{ij} .

Для кількісної оцінки пружної анізотропії використовується диференціальний A_d коефіцієнт пружної анізотропії, величина якого характеризує відхилення пружних властивостей заданого пружного анізотропного середовища від найближчого до нього ізотропного середовища для довільного напрямку хвильової нормалі. Диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії обчислюється за формулою:

$$A_d = \sqrt{\frac{(\Lambda^2)_c - (\Lambda_m^2)_c}{(\Lambda_m^2)_c}} \times 100\%, \quad (13)$$

$$\text{де } (\Lambda^2)_c = \langle \Lambda_{11} \rangle^2 + \langle \Lambda_{22} \rangle^2 + \langle \Lambda_{33} \rangle^2 + 2(\langle \Lambda_{12} \rangle^2 + \langle \Lambda_{13} \rangle^2 + \langle \Lambda_{23} \rangle^2),$$

$$(\Lambda_m^2)_c = \langle \Lambda_{m11} \rangle^2 + \langle \Lambda_{m22} \rangle^2 + \langle \Lambda_{m33} \rangle^2 + 2(\langle \Lambda_{m12} \rangle^2 + \langle \Lambda_{m13} \rangle^2 + \langle \Lambda_{m23} \rangle^2),$$

$$\langle \Lambda \rangle_c = \langle \Lambda_{11} \rangle + \langle \Lambda_{22} \rangle + \langle \Lambda_{33} \rangle.$$

Для класифікації текстур на аксіальні і планальні типи використовувалась характеристична поверхня акустичного тензора $\mu_{ij}^* = C_{ijkl}^* / \rho^*$ [95, 96, 103]. Оскільки тензор μ_{ij}^* - додатньо визначений симетричний тензор другого рангу, то його характеристична поверхня є еліпсоїд. Якщо відомі його власні значення, то можна обчислити параметри акустичної лінійності $L_\mu = \mu_g / \mu_m$ і акустичної сланцюватості $S_\mu = \mu_m / \mu_p$. Тут μ_g, μ_m, μ_p - відпові-

дно, найбільше, проміжне і найменше власні значення ефективного акустичного тензора μ_{ij}^* .

Коефіцієнт акустичної анізотропії A_μ обчислювався за формулою:

$$A_\mu = \left[\frac{\frac{1}{3}[(\mu_g - \mu_m)^2 + (\mu_m - \mu_p)^2 + (\mu_g - \mu_p)^2]}{\mu_g^2 + \mu_m^2 + \mu_p^2} \right]^{1/2} \cdot 100\%. \quad (14)$$

В статті розглядаються результати математичного моделювання ефективних пружних постійних і акустичних властивостей карбонатних колекторів із різними системами орієнтації тріщин і каверн (табл. 1).

Таблиця 1. Типи моделей карбонатних колекторів із різними системами орієнтації тріщин і каверн та їх параметри

Тип моделі	Параметри моделі
TR1	"тріщинний вапняк" (сухі тріщини $\alpha=10^{-4}$, $c x_3$, $K_{TP}=0,01\%$)
TR2	"тріщинний вапняк" (водонасичені тріщини $\alpha=10^{-4}$, $c x_3$, $K_{TP}=0,01\%$)
KV1	"кавернозний вапняк" (сухі каверни $\alpha=2100$, $c x_3$, $K_{KB}=2\%$)
KV2	"кавернозний вапняк" (водонасичені каверни $\alpha=2100$, $c x_3$, $K_{KB}=2\%$)
TRKV1	"кавернозно-тріщинний вапняк" (сухі тріщини $\alpha=10^{-4}$, $c x_3$, $K_{TP}=0,01\%$, сухі каверни $\alpha=2100$, $c x_3$, $K_{KB}=2\%$)
TRKV2	"кавернозно-тріщинний вапняк" (водонасичені тріщини $\alpha=10^{-4}$, $c x_3$, $K_{TP}=0,01\%$, водонасичені каверни $\alpha=2100$, $c x_3$, $K_{KB}=2\%$)
TR2-1	"тріщинний вапняк" (сухі тріщини $\alpha=10^{-4}$, дві системи тріщин $c x_1-0,001$, $c x_3-0,001$, $K_{TP}=0,02\%$)
TR2-2	"тріщинний вапняк" (водонасичені тріщини $\alpha=10^{-4}$, дві системи тріщин $c x_1-0,001$, $c x_3-0,001$, $K_{TP}=0,02\%$)
KV2-1	"кавернозний вапняк" (сухі каверни $\alpha=2100$, дві системи каверн $c x_1-0,001$, $c x_3-0,001$, $K_{KB}=2\%$)
KV2-2	"кавернозний вапняк" (водонасичені каверни $\alpha=2100$, дві системи каверн $c x_1-0,001$, $c x_3-0,001$, $K_{KB}=2\%$)

Закінчення табл. 1

Тип моделі	Параметри моделі
TR3-1	"тріщинний вапняк" (сухі тріщини $\alpha=10^{-4}$, три системи тріщин $c x_1-0,0002, c x_2-0,0003, c x_3-0,0005, K_{TP}=0,1\%$
TR3-2	"тріщинний вапняк" (водонасичені тріщини $\alpha=10^{-4}$, три системи тріщин $c x_1-0,0002, c x_2-0,0003, c x_3-0,0005, K_{TP}=0,1\%$
НКТ1	"гранулярно-кавернозно-тріщинний вапняк" із сухими пустотами $K_{KB}=4,4\%, \alpha=2100, c x_3-0,007, \alpha=891, c x_3-0,0018, \alpha=69, c x_3-0,0088, \alpha=13,76, c x_3-0,0268; K_{TP}=4,84\%$, довільна орієнтація, $\alpha=0,999-0,00657, \alpha=0,3433-0,01485, \alpha=0,026-0,02701; K_{TP}=1,32\%, \alpha=0,0058, c x_1-0,0086, \alpha=0,0001, c x_2-0,0036, \alpha=0,00001, c x_3-0,000972$.
НКТ2	"гранулярно-кавернозно-тріщинний вапняк" із водонасиченими пустотами $K_{KB}=4,4\%, \alpha=2100, c x_3-0,007, \alpha=891, c x_3-0,0018, \alpha=69, c x_3-0,0088, \alpha=13,76, c x_3-0,0268; K_{TP}=4,84\%$, довільна орієнтація, $\alpha=0,999-0,00657, \alpha=0,3433-0,01485, \alpha=0,026-0,02701; K_{TP}=1,32\%, \alpha=0,0058, c x_1-0,0086, \alpha=0,0001, c x_2-0,0036, \alpha=0,00001, c x_3-0,000972$.

Матриця моделей представляла собою твердий скелет із хаотично орієнтованими зернами кристалів кальциту.

Модель "тріщинуватого вапняку" представляє собою одну систему однонаправлено орієнтованих короткою віссю z вздовж осі x_3 сухих (TR1) і водонасичених (TR2) сфероїдальних тріщин формату $\alpha = 0,0001$ із концентрацією $c_1 = 0,0001$. Як видно із одержаних чисельних розрахунків (табл. 2) орієнтація 0,01% сухих тріщин спричиняє значну акустичну анізотропію 23,04%, а їх насичення водою зменшує її майже на 20%. В той же час орієнтація 2% однонаправлених сухих і водонасичених каверн формату $\alpha = 2100$ (моделі KV1, KV2) індують акустичну анізотропію, величина якої трохи більше 1%. Моделі із однонаправленою орієнтацією тріщин і каверн мають поперечно-ізотропну пружну симетрію ($C^*_{11} = C^*_{22}, C^*_{44} = C^*_{55}, C^*_{13} = C^*_{23}$), але однонаправлена орієнтація тріщин має планальну поперечно-ізотропну симетрію – $C^*_{11} > C^*_{33}, C^*_{66} > C^*_{44}, C^*_{12} > C^*_{13}$, а однонаправлена орієнтація каверн – аксіальну поперечно-ізотропну симетрію – $C^*_{11} < C^*_{33}, C^*_{66} < C^*_{44}, C^*_{12} > C^*_{13}$. Для сухих і водонасичених "кавернозно-тріщинних вапняків" із однонаправленою орієнтацією каверн і тріщин характерна планальна поперечно-ізотропна симетрія

Порівняння моделей "тріщинуватого вапняку" із двома і трьома системами тріщин показало (табл. 2), що наявність систем тріщин змінює пружну симетрію текстури колектора і величину коефіцієнта акустичної анізотропії. Зокрема, модель "тріщинуватого вапняку" (TR2-1) із двома системами тріщин має аксіальну поперечно-ізотропну симетрію і величину коефіцієнта акустичної анізотропії 25,2 %.

В той же час модель "тріщинуватого вапняку" (TR3-1), в якій три системи тріщин, має планальну ромбічну симетрію і величину коефіцієнта акустичної анізотропії 18,8 %, незважаючи на те, що її коефіцієнт тріщинної пористості 0,1 %, а моделі TR2-1 набагато менший – 0,02 %.

Водонасичення тріщин суттєво зменшує величину коефіцієнта акустичної анізотропії. При наявності двох систем тріщин змінюється і співвідношення між ефективними пружними постійними. Причому, пружні постійні вздовж координатних осей паралельних орієнтації системам тріщинуватості набагато менші ніж пружні постійні вздовж осей, що перпендикулярно цим напрямкам. (для моделі TR2-1: $C^*_{22} > C^*_{11} = C^*_{33}, C^*_{55} < C^*_{44} = C^*_{66}$,

$C^*_{13} < C^*_{12} = C^*_{23}$). В моделі "тріщинуватий вапняк" (TR3-1) із трьома системами тріщин: $C^*_{11} > C^*_{22} > C^*_{33}, C^*_{44} < C^*_{55} < C^*_{66}, C^*_{12} > C^*_{13} > C^*_{23}$. Тобто пружні постійні найбільші в напрямках, вздовж яких найменша концентрація орієнтованих тріщин.

В моделях "вапняків" із різними типами пористості співвідношення між пружними постійними визначаються типом пористості і співвідношеннями між їх концентраціями однонаправлено орієнтованих тріщин. Зокрема, в моделі "гранулярно-кавернозно-тріщинний вапняк" (НКТ-1) із співвідношеннями $K_{TP} : K_{KB} : K_T = 4,84\% : 2,2\% : 1,32\%$ і широким спектром форматів пустот від $\alpha=2100$ до $\alpha = 10^{-5}$, що однонаправлено орієнтовані, величина коефіцієнту акустичної анізотропії більше за 72,76 %. Пружна симетрія текстури аксіальна ромбічна. При водонасиченні акустична анізотропія різко зменшується до 8,37 %.

Із розв'язку рівняння (1) випливає, що у будь-якому напрямку хвильової нормалі розповсюджуються три фазові швидкості із ортогональними векторами поляризації: v_1^* – квазіповздовжня хвиля, вектор поляризації якої утворює найменший кут із напрямком вектора хвильової нормалі; v_2^* – "швидка" квазіпоперечна хвиля; v_3^* – "повільна" квазіпоперечна хвиля.

Акустична анізотропія карбонатного колектора проявляється у азимутальній залежності фазової швидкості від напрямку хвильової нормалі та розщепленні хвиль поперечної поляризації і відхиленні вектора пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі. Причому, фазові швидкості не співпадають із променевими і груповими швидкостями.

Для кількісної оцінки впливу анізотропії карбонатного колектора на розповсюдження пружних хвиль застосовується цілий набір параметрів анізотропії пружних хвиль:

а) вказівна поверхня фазових швидкостей квазіповздовжньої хвилі;

б) вказівна поверхня різниці між фазовими швидкостями "швидкої" і "повільної" квазіпоперечних пружних хвиль, що характеризує інтенсивність явища розщеплення поперечних хвиль вздовж заданого напрямку хвильової нормалі (рис. 1);

с) диференціальний коефіцієнт пружної анізотропії, що характеризує на скільки анізотропія середовища відрізняється від найближчого до нього ізотропного середовища.

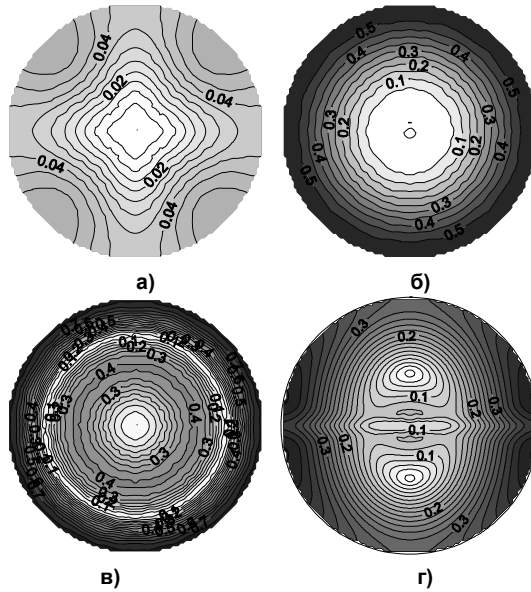


Рис. 1. Стереопроєкції ізоліній параметрів різниці між фазовими швидкостями "швидкою" і "повільною" квазіпоперечних пружних хвиль для моделей: а) – "водонасичений кавернозний вапняк", б) – "газонасичений кавернозно-тріщинний вапняк", в) – "водонасичений тріщинний вапняк", г) – "водонасичений гранулярно-кавернозно-тріщинний вапняк"

Індикатриси фазової швидкості квазіпоперечної хвилі із однонаправленими сухими і водонасиченими тріщинами характеризуються найменшими значеннями вздовж напрямку орієнтації тріщин. Величини фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі не залежать від азимутального кута. В напрямку, якій співпадає із орієнтацією тріщин, різниця між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями близька до нуля. Тобто явище розщеплення поперечних хвиль відсутнє. В цьому ж напрямку величина диференціального коефіцієнту пружної анізотропії дорівнює нулеві (рис. 1).

Найбільші фазові швидкості квазіповздовжніх хвиль і інтенсивність розщеплення квазіпоперечних хвиль спостерігається у площині, яка перпендикулярна напрямку орієнтації тріщин.

Наявність двох систем тріщин суттєво змінює характер просторових змін параметрів анізотропії пружних хвиль (моделі TR2-1, TR2-2), які розрізняються для сухих і водонасичених тріщин. Найбільша фазової квазіповздовжньої швидкості спостерігається в напрямку, що перпендикулярний площині, в якій розташовані локалізовані напрямки локалізації тріщин ($c \parallel x_1$ і $c \parallel x_3$) одноквової концентрації. В площині локалізації орієнтованих тріщин (x_1x_3) спостерігаються найменші значення фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі. При водонасиченні число напрямків із екстремальними значеннями фазових швидкостей квазіпоперечних хвиль зростає до 9. Значно ускладнюється характер інтенсивності розщеплення квазіпоперечних хвиль.

В моделі "тріщинуватий вапняк" із трьома ортогональними системами сухих і водонасичених тріщин (TR3-1, TR3-2) індикатриса квазіповздовжніх хвиль змінюється. Мінімальні швидкості квазіпоперечних хвиль спостерігаються вздовж напрямків орієнтації тріщин. В цих же напрямках спостерігається і найбільш інтенсивні ефекти розщеплення квазіпоперечних хвиль. Тобто, різниця між "швидкою" і "повільною" квазіпоперечними хвилями найбільша вздовж локалізованих напрямків орієнтації сухих тріщин. При водонасиченні максимальні ефекти розщеплення поперечних хвиль зміщуються і локалізуються в

напрямок під кутом $30-40^\circ$ до напрямків орієнтації тріщин і знаходяться в цих же координатних площинах.

В моделі "кавернозний вапняк" з однонаправленими орієнтованими сухими і водонасиченими кавернами (TRKV-1, TRKV-2) максимальна величина фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі спостерігається вздовж напрямків орієнтації каверн. Найбільш інтенсивні ефекти розщеплення квазіпоперечних хвиль спостерігаються в локалізованих напрямках, орієнтованих під кутом 45° до орієнтації каверн.

В складнобудованих "гранулярно-кавернозно-тріщинних вапняках" із сухими і водонасиченими порами, тріщинами і кавернами (моделі НКТ1, НКТ2) індикатриси фазових швидкостей квазіповздовжніх хвиль відображають, в першу чергу, характер просторової орієнтації мікротріщин. Вздовж напрямків орієнтації фазові швидкості квазіповздовжніх хвиль – мінімальні. Вздовж напрямків орієнтації сухих тріщин спостерігаються і найбільш інтенсивні ефекти розщеплення квазіпоперечних хвиль. При водонасиченні ці напрямки зміщуються від напрямку орієнтації відносичених тріщин на кут $30-35^\circ$. Вздовж цих напрямків спостерігаються і найбільші величини диференціальних коефіцієнтів пружної анізотропії.

При аналізі результатів моделювання визначено, що орієнтація сухих тріщин спричиняє значну акустичну анізотропію (до 23,04 %), а їх насичення водою зменшує її майже на 20 %. Порівняння моделей "вапняків" із різними системами тріщин показало, що наявність систем тріщин змінює пружну симетрію текстури колектора і величину коефіцієнта акустичної анізотропії (симетрію – від поперечно-ізотропної до планальної ромбічної і величину коефіцієнта акустичної анізотропії від 1 до 18,8 %). Пружні постійні найбільші в напрямках, вздовж яких концентрація орієнтованих тріщин є найменшою. Встановлено, що в напрямку, який співпадає із орієнтацією однонаправлених тріщин, явище розщеплення поперечних хвиль відсутнє, величина диференціального коефіцієнту пружної анізотропії дорівнює нулю, а найбільше розщеплення квазіпоперечних хвиль спостерігається у площині, яка перпендикулярна напрямку орієнтації тріщин, на відміну від "кавернозного вапняку",

де найбільш інтенсивні ефекти спостерігаються в локалізованих напрямках, орієнтованих під кутом 45° до орієнтації каверн.

В площині локалізації двох систем орієнтованих тріщин (x_1x_3) спостерігаються найменші значення фазової швидкості квазіповздовжньої хвилі. Значно ускладнюється характер інтенсивності розщеплення квазіпоперечних хвиль із трьома ортогональними системами сухих і водонасичених тріщин. При водонасиченні максимальні ефекти розщеплення поперечних хвиль зміщуються і локалі-

зуються в напрямках під кутом 30-40° до напрямків орієнтації тріщин і знаходяться в цих же координатних площинах. В складнобудованих вапняках індикатрис фазових швидкостей квазіповздовжніх хвиль відображають характер просторової орієнтації мікротріщин.

При водонасиченні ці напрямки зміщуються від напрямку орієнтації водонасичених тріщин на кут 30-35°. Вздовж таких напрямків спостерігаються і найбільші величини диференціальних коефіцієнтів пружної анізотропії.

Таблиця 2. Результати математичного моделювання параметрів анізотропії пружних хвиль карбонатних колекторів із різними системами орієнтованих тріщин і каверн

Тип моделі	C_{mn}^* , ГПа									ρ^* , кг/м ³	A_{pr} , %	Тип пружної симетрії, текстури
	C_{11}^*	C_{22}^*	C_{33}^*	C_{44}^*	C_{55}^*	C_{66}^*	C_{12}^*	C_{13}^*	C_{23}^*			
TR1	120,45	120,45	53,490	27,42	27,42	42,28	35,90	18,61	18,61	2,7117	23,04	Планальна поперечно-ізоτροпна
TR2	129,57	129,57	128,88	27,42	27,42	42,29	45,02	44,84	44,84	2,7116	3,77	Планальна поперечно-ізоτροпна
KV1	121,79	121,79	126,20	40,61	40,61	39,84	42,84	42,50	42,50	2,658	1,20	Аксiальна поперечно-ізоτροпна,
KV2	121,87	121,87	126,20	40,61	40,61	39,84	43,14	42,56	42,56	2,678	1,18	Аксiальна поперечно-ізоτροпна
TRKV1	79,71	79,71	35,73	15,59	15,59	23,47	32,81	18,00	18,00	2,694	23,2	Планальна поперечно-ізоτροпна
TRKV2	94,69	94,69	94,67	15,59	15,59	23,47	47,80	47,70	47,70	2,696	2,84	Планальна поперечно-ізоτροпна
TR2-1	51,85	114,34	51,85	27,41	20,28	27,41	15,45	8,01	15,45	2,711	25,8	Аксiальна поперечно-ізоτροпна
TR2-2	128,77	129,47	128,77	27,41	20,28	27,41	44,76	44,56	44,75	2,712	2,06	Аксiальна поперечно-ізоτροпна
KV2-1	120,67	117,94	120,67	38,23	38,97	38,23	42,25	41,53	42,25	2,604	0,83	Планальна поперечно-ізоτροпна
KV2-2	120,76	118,07	120,78	30,23	38,97	38,23	42,64	41,60	42,39	2,643	0,82	Планальна поперечно-ізоτροпна
TR3-1	32,09	23,74	15,61	7,61	8,80	11,38	1,91	1,28	0,97	2,709	18,81	Планальна ромбiчна
TR3-2	127,28	129,59	125,24	7,91	8,80	11,38	43,34	42,95	42,77	2,710	1,59	Планальна ромбiчна
HKT1	30,23	2,10	0,98	0,53	0,72	1,72	0,19	0,08	0,01	2,424	72,76	Аксiальна ромбiчна
HKT2	62,25	68,62	78,12	0,53	0,73	1,72	17,5	16,72	18,08	2,530	8,37	Аксiальна ромбiчна

Висновки. Таким чином, досліджені ефективні пружні постійні і акустичні властивості карбонатних колекторів (тріщинуватого, кавернозно-тріщинуватого та гранулярно-кавернозно-тріщинуватого вапняків) із однією, двома та трьома системами орієнтації тріщин і каверн.

Вплив тріщинуватості та кавернозності впливово відзначається на значеннях швидкостей пружних хвиль, інтегральних та диференціальних коефіцієнтах анізотропії. Надбана інформація може бути використана як попереднє наближення при вивченні структури пустотного простору та ємнісних властивостей реальних складнобудованих карбонатних порід-колекторів при складанні математичних моделей карбонатних порід та проведенні інтерпретації сейсмоакустичних даних.

1. Аракчеев Н.Т., Бондарь В.В., Могилевич М.В. Способ определения пористости трещинно-кавернозных карбонатных пород // Б.И. – 1981. –

№ 11 – Ас 635843. 2. Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Математичне моделювання геофізичних параметрів. К., 1999. 3. Вижева С.А., Безродна І.М. Визначення структури пустотного простору складнобудованих геологічних середовищ при вирішенні задач промислової геофізики та геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів // Геоінформатика. – 2003. – №1. 4. Klimentos T., McCann C. Relationship among compressional wave attenuation, porosity, clay content and permeability in sandstones // Geophysics, 1990, vol. 5. Федорішин А.С. Влияние ориентированной системы трещин на анизотропию скоростей распространения упругих волн в твердых телах (исследование горных пород) // Докл. АН УССР. Сер. А. Физ. мат. науки. – 1975. – № 9. Петровський А.П. Информационное обеспечение и модельные представления интегральной интерпретации геолого-геофизических данных при изучении нефтегазоносных структур // Геофиз. журн. – 2004. – 26, N 3. 7. Cheng C.H., Toksoz M.H. Inversion of seismic velocities for the pore aspect ratio spectrum of a rock // Geophys Res. 8. Александров К.С., Продайвода Г.Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. – Новосибирск, 2000. 9. Mori T., Tanaka K. Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with misfitting inclusions // Acta Metallurgica, 1973, v. 21.

Надійшла до редколегії 25.11.09

УДК 550.34

О. Тополук, інж. І к., О. Трипільський, д-р геол.-мінералог. наук

ХАРАКТЕР МІГРАЦІЇ ЕПІЦЕНТРІВ ЗЕМЛЕТРУСІВ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-наук, проф. С.А. Вижевою)

Проаналізовано просторово-часовий характер міграції епіцентрів помірних і сильних землетрусів центральної частини Карпатського регіону. Показано, що з року в рік відстань між епіцентрами сильних і середніх землетрусів поступово зростає, а самі епіцентри мігрують у північно-західному напрямку.

Spatial-time character of the moderate and strong epicenter earthquakes migration in the central part of the Carpathian region were analyzed. It is shown that distance between epicenters of the strong and moderate earthquakes from year to year gradually increase and epicenters itself migrate in north-west direction.

Вивчення просторово-часового розподілу сейсмічності в межах сейсмоактивних регіонів має важливе значення для з'ясування особливостей сеймотектонічних процесів та для обґрунтованого підходу до виконання сейсмічного районування.

У роботі досліджується й аналізується характер міграції сильних та помірних землетрусів центральної частини Карпатського регіону.

На сьогоднішній день накопичено значний досвід подібних досліджень у різних регіонах земної кулі. Наведемо деякі приклади.

У межах Кримсько-Чорноморського регіону помірні за інтенсивністю морські землетруси мають своєрідний "човниковий" характер як по широті, так і по довготі, мігруючи орієнтовано з південного заходу на північний схід [1]. Вогнища найсильніших кримських землетрусів протягом