

and high-speed suction head of apparatus on the characteristics and parameters of high-pressure sump apparatus shown that in contrast to traditional ideas and recommendations, the cost-effective option is to use a static head (without special compulsory increase of suction flow velocity).

Two-stage scheme of an apparatus with a low-pressure preswitched on stage, creating a static suction head on the main high-pressure stage justifies 1.5-2.5 times higher operational efficiency compared with the traditionally used single-stage scheme.

**Practical value.** Operation of the high-pressure sump apparatus with a static suction head is the most effective reserve of improvement of the technological schemes of sump high-pressure booster apparatus as a whole.

**Keywords:** *sump pumping, water jet apparatus, technological parameters, efficiency, head, dimensionless characteristics*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук  
Е.І. Антоновим. Дата надходження рукопису 10.11.13.*

УДК 622.02:534.2

**В.А. Машченко<sup>1</sup>**, канд. фіз.-мат. наук, доц.,  
**І.О. Садовенко<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, проф.

1 – Рівненський державний гуманітарний університет, м.Рівне, Україна, e-mail: volodymyr\_mashchenko @ukr.net  
2 – Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м.Дніпропетровськ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФОРМАЦІЇ НЕІДЕАЛЬНО-ПРУЖНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД

**V.A. Mashchenko<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Phys.-Math.),  
Associate Professor,  
**I.O. Sadovenko<sup>2</sup>**, Dr. Sci. (Tech.), Professor

1 – Rivne State Humanitarian University, Rivne, Ukraine,  
e-mail: volodymyr\_mashchenko@ukr.net  
2 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine

## STUDY OF THE IMPERFECTLY ELASTIC ROCK DEFORMATION BEHAVIOR

**Мета.** На основі модельного підходу та інтерпретації експериментальних даних швидкостей поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль проаналізувати вплив структурно-морфологічних особливостей та пружних характеристик дефектів на особливості деформації ряду пісковиків.

**Методика.** Включала проведення серії експериментальних досліджень щільності, пористості та визначення швидкостей поширення поздовжніх та поперечних акустичних хвиль у зразках пісковиків з різною структурною організацією.

**Результати.** За швидкостями поширення поздовжніх та поперечних акустичних хвиль для пісковиків з різними значеннями ефективного коефіцієнта Пуассона визначені пружні параметри дефектності структури. Проведено порівняльний аналіз відношення нормальної та тангенціальної складових деформації з ефективним коефіцієнтом Пуассона пісковиків. На основі варіації швидкостей акустичних хвиль під дією зовнішнього тиску проведено розрахунок коефіцієнта Пуассона середовища-матриці.

**Наукова новизна.** Розглянута деформаційна поведінка пісковиків на основі моделі мікронеоднорідного середовища у вигляді пружної матриці й планарних дефектів включень. Теоретичні оцінки параметрів дефектів через пружні сталі лінійної теорії пружності вказують на адекватність застосування моделі для опису деформованого стану неідеально-пружних гірських порід. Обґрунтована можливість існування від’ємного коефіцієнта Пуассона у пісковиків при високій нормальній стисливості дефектів структури із внеском контактних взаємодій.

**Практична значимість.** Розроблена методика дослідження особливостей деформованого стану неідеально-пружних гірських порід методами неруйнуючого контролю. Отримані співвідношення для оцінки нормальної й тангенціальної податливості через ефективні модулі пружності мікронеоднорідного середовища та модулі пружності й коефіцієнт Пуассона середовища-матриці. Показано, що між концентраціями дефектів, їх податливостями й ефективним коефіцієнтом Пуассона, що визначає деформаційно-пружні характеристики середовища, існує обернена залежність.

**Ключові слова:** *мікронеоднорідне середовище, пружні параметри, коефіцієнт Пуассона, поздовжня та поперечна акустичні хвилі, швидкість поширення, пісковик*

**Постановка проблеми.** Більшість задач, що розв’язуються методами лінійної акустики на різних

масштабних рівнях (від геоакустики до сейсмології), розглядають об’єкти, що досліджуються, у рамках пружних представлень і у припущенні суцільності сейсмогеологічних середовищ. Така ідеалізація випра-

вдана доки відмінність реальних середовищ від їх пружних моделей не визначає суттєвого впливу на точність отриманих результатів. У той же час є достатньо широкий клас геоматеріалів, неідеальних з позиції теорії пружності, властивості яких досить значно відрізняються від властивостей більшості консолидованих гірських порід. Їх апроксимація ідеально-пружним середовищем або неприйнятна із-за кардинальних розбіжностей у фізиці процесів, що відбуваються на мікро- й мезорівнях, або призводить до досить великих похибок при визначенні характеристичних параметрів.

З усієї різноманітності гірських порід з неідеальними акустичними властивостями можна виділити декілька класів, що представляють інтерес з практичної точки зору. По-перше, це породи, для яких ефекти, що пов'язані з внутрішнім тертям, можуть проявлятися при експериментальних дослідженнях у реальних умовах. До таких ефектів, крім інтенсивного затухання швидкостей поширення акустичних хвиль, можна віднести власну дисперсію швидкостей об'ємних (поздовжніх, поперечних) акустичних хвиль, вплив контрасту поглинальних властивостей суміжних середовищ на процеси відбивання та заломлення, а також більш складний, ніж у лінійній акустиці, взаємозв'язок характеристик об'ємних хвиль і хвиль в об'єктах з малими, у порівнянні з довжиною хвилі, розмірами.

Ще один клас неідеально-пружних середовищ – породи, включаючи неконсолідовані ґрунти, що знаходяться під дією руйнуючих навантажень. Перебіг стадії попереднього руйнування в таких породах призводить до переходу середовища, що деформується, у метастабільний стан.

Інтерес до об'єктів такого роду обумовлений, у першу чергу, перспективною можливістю розробки ефективних методів моніторингу потенційно небезпечних геотехнічних об'єктів і прогнозу природних і техногенних явищ: зсувів, обвалів, землетрусів [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми деформаційної поведінки неідеально-пружних гірських порід описують на основі групи моделей, головною складовою яких є твердий скелет і конкретні моделі різного роду дефектів. Зокрема це стосується моделей дефектів міжзернових контактів, розроблених Dere-siewicz H., Digby J., Duffy J., Mindlin R., а також моделі еліптичних тріщин Walsh, та їх подальших модифікацій, сфероїдальних і циліндричних пор Mavko G. Гірська порода в такому випадку розглядається як мікронеоднорідне пружне середовище з ефективними інтегральними структурно-механічними макропараметрами.

При цьому слід відмітити, що наперед вибрана конкретна модель дефектів, як правило, обмежує аналіз експериментальних даних стосовно визначення пружних параметрів скелету породи та власне дефектів.

Аналіз останніх публікацій по даній проблемі показує, що для опису деформаційної поведінки неоднорідних середовищ з різним рівнем структурної неоднорідності використовується методологічний перехід за наступним алгоритмом: „модель“ – „структурно-механічні параметри“ – „фізичний результат процесу деформації“.

Так у роботі [2], в ізотермічному наближенні, сформульована модель насиченого пористого середовища з крихким скелетом, що деформується та руйнується як сукупність взаємопроникаючих і взаємодіючих між собою континуумів, які одночасно займають один і той же об'єм. Аналіз поведінки такої моделі дозволив авторам провести розв'язок задачі про консолидацію пористого півпростору з крихким скелетом під дією нормального навантаження.

Авторами роботи [3] формулюється математична модель пружно-пластичної деформації гірської породи з можливістю врахування руху флюїду в поровому просторі, при якій на мікрорівні реалізується крихке руйнування та зсувні ковзання, а на макрорівні – катакластична течія.

У роботі [4] на основі аналізу даних швидкостей поширення квазіпоздовжніх та квазіпоперечних хвиль у зразках гірських порід при високих тисках і температурах, й аналогічних швидкостях, розрахованих на основі функції розподілу зерен за орієнтацією, реконструйованою за даними нейтронно-дифракційного текстурного експерименту, виявлені характерні невідповідності між експериментальними та модельними характеристиками. При цьому показано, що підвищення концентрації мікротріщин і пор значно впливає на зменшення величин швидкостей поширення.

Особливий інтерес викликає дослідження поведінки пісковиків під дією механічних навантажень, як модельних неоднорідних середовищ із неідеально-пружними властивостями. Так у роботі [5] проведені дослідження поведінки пісковика Бера при циклічних повільних навантаженнях. Аналіз поведінки зразка модельного пісковика проводився на основі моделі динамічного поведінки гірських порід під дією повільних механічних навантажень. При цьому відгук внутрішніх обмінних процесів, що зумовлені порушенням рівноваги під дією інтенсивних навантажень на макрорівні, моделюють доречними формальними релаксаційними механізмами стандартного твердого тіла, пружним механізмом з присипанням та механізмом пластичної деформації. Отримані експериментальні та теоретичні результати вказують на те, що важливим механізмом, який слід враховувати в моделі, є релаксаційний.

**Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми.** Релаксаційна поведінка пісковиків, як неідеально-пружних гірських порід, під дією механічних навантажень, враховуючи їх мікронеоднорідність і дефектність структури, виявляє колоритний спектр різноманітних особливостей. Аналіз отриманих експериментальних даних, у першу чергу, спрямований на побудову рівнянь стану таких середовищ та розуміння внутрішніх процесів, що відбуваються під час таких навантажень, розкриває можливості для фізичного та математичного моделювання таких систем. Однак, дослідити в деталях перебіг усіх процесів неможливо, проте важливими є не самі внутрішні процеси, а їх вплив на макропараметри структури [5]. У даному аспекті дослідження швидкостей поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль дає

змогу провести аналіз адекватності запропонованих моделей неоднорідних середовищ з розмежуванням внеску нормальних і тангенціальних складових при механічних навантаженнях.

Крім цього, надійність методу та апаратури акустичного контролю, за умови теоретичного обґрунтування основних параметрів поширення акустичних коливань у мікронеоднорідному породному масиві, є основою геодинамічного моніторингу.

**Формулювання цілі статті.** Удосконалення відомих і розвиток інших моделей поведінки мікронеоднорідних неідеально-пружних середовищ є важливим завданням як із точки зору опису нових експериментальних результатів, так і моделювання процесів поширення поздовжніх та поперечних акустичних хвиль у таких релаксаційних структурах. При цьому основним результатом є розрахунок структурно-механічних параметрів запропонованої моделі, її адекватність та порівняльний аналіз з іншими модельними представленнями.

**Модель мікронеоднорідного середовища.** Розглянемо модель мікронеоднорідного середовища, де властивості дефектів будемо описувати параметрами стислості, що не пов'язані безпосередньо з конкретною фізичною моделлю [6]. Середовище представимо у вигляді пружної однорідної матриці, що містить „м'які“ планарні дефекти-включення, яким можуть відповідати реальні пори, тріщини, контакти або їх комбінації, поблизу яких при навантаженні проходить концентрація пружної енергії. При цьому „м'якість“ дефектів є значно більшою в порівнянні зі стисливістю однорідного середовища-матриці.

Будемо вважати, що дефекти ізотропно-орієнтовані в середовищі-матриці, а їх розміри (приведені радіуси включень) і відстані між ними менші за характерну довжину поздовжньої та поперечної пружних хвиль у середовищі.

У такому випадку ефективні модулі ( $E_{eff}$ ,  $\mu_{eff}$ ) мікронеоднорідного середовища знайдено методом енергетичного балансу – сумуванням пружної енергії однорідного середовища-матриці та енергії, що поглинається дефектами у відповідному полі пружних напружень, визначаються наступним чином [6]

$$E_{eff} = \frac{E}{1 + \frac{1}{5}N_1 + \frac{4}{15}(1+\nu)N_2}; \quad (1)$$

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + \frac{2}{15(1+\nu)}N_1 + \frac{2}{5}N_2}, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль Юнга середовища-матриці;  $\mu$  – модуль зсуву середовища-матриці;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона середовища-матриці.

Параметри  $N_1$  і  $N_2$  у співвідношеннях (1) та (2) визначають спільно концентрацію й податливість дефектів (нормальну для  $N_1$  і тангенціальну для  $N_2$ ) [6].

Співвідношення між тангенціальною та нормальною податливостями в загальному випадку є достатньо довільним, так що параметр  $N_2$  може бути меншим, більшим і співмірним з параметром  $N_1$ .

Незалежно від відношення  $N_1$  і  $N_2$ , ефективні модулі мікронеоднорідного середовища є меншими за величини  $E$  і  $\mu$ , а ефективний коефіцієнт Пуассона може бути як більшим, так і меншим, ніж у середовищі-матриці.

Ефективні модулі мікронеоднорідного середовища за швидкостями поширення поздовжньої ( $v_l$ ) та поперечної ( $v_t$ ) акустичних хвиль визначимо наступним чином

$$\begin{aligned} E_{eff} &= \rho_{eff} v_l^2; \\ \mu_{eff} &= \rho_{eff} v_t^2, \end{aligned} \quad (3)$$

а модулі  $E$  і  $\mu$  відповідно

$$\begin{aligned} E &= \rho(v_l + \Delta v_l)^2; \\ \mu &= \rho(v_t + \Delta v_t)^2, \end{aligned}$$

де  $\rho_{eff}$  – ефективна щільність мікронеоднорідного середовища;  $\rho$  – щільність середовища-матриці;  $\Delta v_l$ ,  $\Delta v_t$  – відповідно, варіації швидкостей поширення поздовжньої та поперечної хвиль.

Важливим параметром у процесах поширення, поглинання та розсіювання акустичних хвиль виступає коефіцієнт Пуассона, що характеризує деформаційно-пружні властивості середовища. Ефективний коефіцієнт Пуассона ( $\nu_{eff}$ ) мікронеоднорідного середовища будемо визначати наступним чином [Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.]

$$\nu_{eff} = \frac{2 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{v_l}{v_t}\right)^2\right)}. \quad (4)$$

Величини  $N_1$  і  $N_2$  визначимо зі співвідношень (2), (3) наступним чином

$$N_1 = 15 \left( 2 \frac{\mu}{\mu_{eff}} (1 + \nu) - \frac{E}{E_{eff}} - 2\nu - 1 \right); \quad (5)$$

$$N_2 = \frac{15 \left( 2 \frac{E}{E_{eff}} - 3 \frac{\mu}{\mu_{eff}} (1 + \nu) + 3\nu + 1 \right)}{2(1 + \nu)}. \quad (6)$$

**Експериментальна частина.** Досліджували зразки пісковиків порід Прикарпаття, Криму, поліської серії та модельні пісковики Navajo, Weber, Nugget у широкому інтервалі значень ефективного коефіцієнта Пуассона середовища.

Ефективну щільність  $\rho_{eff}$  пісковиків досліджували методом гідростатичного зважування. Щільність ( $\rho$ ) середовища-матриці визначали за ефективною пористістю зразків, яку досліджували методом водонасичення згідно з ГОСТ 26450.1-85. Відношення величин  $\frac{\rho_{eff}}{\rho}$  для серії зразків представлено в табл. 1 і свідчить про їх статистичну збіжність.

Експериментальні дослідження швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль проводили в імпульсному режимі в поєднанні з методом обертаючої пластини під час поздовжньої й зсувних деформацій за методикою роботи [7]. Для досліджених зразків значення  $v_l$  і  $v_t$ , відповідно, лежали в діапазонах 3180 ÷ 3430 та 2090 ÷ 1780 м/с, при цьому ефективний коефіцієнт Пуассона змінювався в межах 0,12 ÷ 0,32 (табл. 1).

Експериментальні значення  $v_l$  і  $v_t$  для пісковиків Navajo, Weber, Nugget взяті з роботи [8], а ефективний коефіцієнт Пуассона розрахований за співвідношенням (4).

Вважаючи, що варіації  $\Delta v_l$ ,  $\Delta v_t$  для всіх пісковиків дорівнюють зміні відповідних швидкостей при тисках 50÷100МПа на зразок, при яких високотискувані дефекти будуть практично закриті [8], коефіцієнт Пуассона середовища-матриці обчислювали за співвідношенням

$$\nu = \frac{2 - \left( \frac{v_l + \Delta v_l}{v_t + \Delta v_t} \right)^2}{2 \left( 1 - \left( \frac{v_l + \Delta v_l}{v_t + \Delta v_t} \right)^2 \right)}$$

Структурно-механічні параметри ряду пісковиків

| Зразок          | $v_l$ , м/с | $v_t$ , м/с | $\nu_{eff}$ | $\Delta v_l$ , м/с | $\Delta v_t$ , м/с | $\nu$ | $\frac{\rho_{eff}}{\rho}$ | $\frac{E_{eff}}{E}$ | $\frac{\mu_{eff}}{\mu}$ |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|--------------------|-------|---------------------------|---------------------|-------------------------|
| Пісковик Weber  | 2450        | 1800        | -0,09       | 2100               | 1250               | 0,09  | 0,82                      | 0,44                | 0,48                    |
| Пісковик Nugget | 3760        | 2610        | 0,04        | 760                | 410                | 0,10  | 0,91                      | 0,76                | 0,79                    |
| Пісковик Navajo | 4100        | 2780        | 0,07        | 760                | 430                | 0,11  | 0,87                      | 0,73                | 0,75                    |
| Пісковик 1      | 3180        | 2090        | 0,12        | 680                | 370                | 0,16  | 0,83                      | 0,68                | 0,71                    |
| Пісковик 2      | 3280        | 2060        | 0,17        | 800                | 360                | 0,23  | 0,85                      | 0,68                | 0,72                    |
| Пісковик 3      | 3390        | 1995        | 0,24        | 800                | 320                | 0,28  | 0,85                      | 0,69                | 0,73                    |
| Пісковик 4      | 3430        | 1780        | 0,32        | 820                | 260                | 0,35  | 0,86                      | 0,69                | 0,75                    |

Таблиця 1

Розрахунки відношень ефективних модулів до модулів середовища-матриці  $\left( \frac{E_{eff}}{E}, \frac{\mu_{eff}}{\mu} \right)$  представлені

в табл. 2. Аналіз результатів показує, що максимум відношень модулів характерний для пісковика Nugget, а мінімум для пісковика Weber. Зі зростанням величини ефективного коефіцієнта Пуассона зразків пісковиків від 0,04 величина відношення для модулів Юнга зменшується і при  $\nu_{eff} \geq 0,12$  залишається, практично, постійною величиною. Неоднозначно змінюється відношення модулів зсуву при збільшення величини  $\nu_{eff}$  для ряду пісковиків. Для пісковика 1, при  $\nu_{eff} = 0,12$ , має локальний мінімум. У подальшому, при збільшенні ефективного коефіцієнта Пуассона, величина відношення  $\frac{\mu_{eff}}{\mu}$  зростає.

**Результати.** Результати розрахунків величин  $N_1$  і  $N_2$  за співвідношеннями (5), (6) представлені в табл. 2.

Аналіз експериментальних результатів і теоретичних розрахунків при незначній зміні пористості (за виключенням пісковика Nugget), а, відповідно, й об'ємної концентрації дефектів, показує, що зі збільшенням ефективного коефіцієнта Пуассона зразків концентрація та податливість нормально орієнтованих дефектів зменшується.

Структурно-механічні параметри моделі мікронеоднорідного середовища

| Зразок          | $N_1$ | $N_2$ | $\frac{N_1}{N_2}$ | $\nu_{eff}$ , (7) | $\frac{N_1}{N_2}$ , (8) | $\alpha N_0$ , (9) | $\alpha N_0$ , (10) | $\alpha N_0$ , (11) |
|-----------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Пісковик Weber  | 13,21 | 1,94  | 6,8               | -0,12             | 0,57                    | 6,26               | 12,31               | 9,73                |
| Пісковик Nugget | 2,22  | 0,51  | 4,3               | 0,01              | 0,58                    | 0,77               | 1,21                | 1,22                |
| Пісковик Navajo | 1,90  | 0,79  | 2,4               | 0,06              | 0,59                    | 0,45               | 0,56                | 0,58                |
| Пісковик 1      | 1,76  | 1,37  | 1,3               | 0,15              | 0,63                    | 0,37               | 0,14                | 0,03                |
| Пісковик 2      | 1,70  | 1,47  | 1,2               | 0,20              | 0,69                    | 0,48               | 0,25                | 0,14                |
| Пісковик 3      | 1,35  | 1,54  | 0,9               | 0,25              | 0,74                    | 0,26               | 0,18                | 0,13                |
| Пісковик 4      | 0,92  | 1,67  | 0,6               | 0,33              | 0,82                    | 0,16               | 0,11                | 0,07                |

Таблиця 2

Залежність параметра  $N_2$  від значення ефективного коефіцієнта Пуассона є нелінійною. Максимум величини  $N_2$  спостерігається для пісковика Weber, а мінімум для пісковика Nugget. Зі зростанням величини  $v_{eff}$  від 0,04 – величина  $N_2$  зростає.

Аналіз відношення величин  $\frac{N_1}{N_2}$  показує, що в межах значень ефективного коефіцієнта Пуассона 0,12÷0,24 пісковиків концентрації та податливості нормальних і тангенціальних дефектів у цілому співмірні (величина  $\frac{N_1}{N_2} \cong 1$ ). Для зразка пісковика

4 з величиною  $v_{eff} = 0,32$  відношення  $\frac{N_1}{N_2} = 0,6 < 1$ ,

що вказує на більшу зсувну податливість дефектів відносно нормальної податливості.

Для пісковиків з ефективним коефіцієнтом Пуассона від 0,09 до 0,07 відношення  $\frac{N_1}{N_2} > 1$ , що вказує на високу податливість дефектів по відношенню до нормального стискання.

Характерною особливістю величини  $\frac{N_1}{N_2}$  є те,

що зі збільшенням  $v_{eff}$  відношення зменшується від 6,8 (для пісковика Weber) до 0,6 (пісковик 4).

Зміна швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль під дією зовнішнього тиску носить нелінійний характер при зміні ефективного коефіцієнта Пуассона зразків і визначається, у першу чергу, орієнтацією планарних дефектів відносно напрямку поширення. Аналіз експериментальних даних зміни швидкостей, що в теоретичних оцінках визначає коефіцієнт Пуассона середовища-матриці, показує, що величина  $v$  для всіх зразків вища за відповідні значення  $v_{eff}$ .

У діапазоні значень ефективного коефіцієнта Пуассона від 0,09 до 0,12 різниця між відповідними значеннями зменшується від 0,18 до 0,04. Для пісковика 2 різниця між відповідними значеннями  $v$  і  $v_{eff}$  складає 0,06 і в подальшому при збільшенні величини  $v_{eff}$  до 0,24 різниця дорівнює 0,04, а при максимальному значенні  $v_{eff} = 0,32$  є мінімальною 0,03.

Ефективний коефіцієнт Пуассона, виражений через податливості  $N_1$  і  $N_2$ , дорівнює [8]

$$v_{eff} = \frac{v - \frac{1}{15}N_1 + \frac{2}{15}(1+v)N_2}{1 + \frac{1}{5}N_1 + \frac{4}{15}(1+v)N_2}. \quad (7)$$

Розрахунок величини  $v_{eff}$  за співвідношенням (7) представлений у табл.1. Для зразків пісковиків Navajo, Weber, Nugget теоретичне значення нижче за експериментальне, а для зразків пісковиків 1–4 розрахунок дає вище значення ефективного коефіцієнта Пуассона в порівнянні з експериментом.

Для моделі еліптичних тріщин відношення податливостей, виражених через коефіцієнт Пуассона матриці, буде [6]

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{1+v}{2-v}. \quad (8)$$

Оцінка величини відношення показує, що модель еліптичних тріщин як планарних дефектів задовільно описує характер податливостей для зразків пісковиків 3, 4 (табл. 2). Відповідно, для інших зразків модель практично не прийнятна.

У роботі [9] отримане співвідношення для оцінки величини  $v_{eff}$  тріщинуватого середовища

$$v_{eff} = \frac{v - \frac{\alpha N_0}{16}}{1 + \frac{3}{8}\alpha N_0}, \quad (9)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, що визначається параметрами тріщини,  $\alpha \cong \Delta V \frac{E}{\sigma_n} > 0$ ;  $\Delta V$  – зміна об'єму

тріщини;  $N_0$  – концентрація першочергово розкритих тріщин;  $\sigma$  – нормальна напруга

Теоретична оцінка величини  $\alpha N_0$  зі співвідношення (9) для ряду пісковиків представлена в табл. 2. Аналіз отриманих даних показує, що зі збільшенням ефективного коефіцієнта Пуассона пісковиків, а відповідно й коефіцієнта Пуассона середовища-матриці, значення  $\alpha N_0$  зменшується в ряді за виключенням пісковика 2.

Визначимо величину  $\alpha N_0$  зі співвідношень (7) і (9) відповідно через коефіцієнт Пуассона середовища-матриці, ефективний коефіцієнт Пуассона та величини  $N_1, N_2$

$$\alpha N_0 = \frac{16(N_1(1+3v) + 2N_2(2v^2 + v - 1))}{15 + 90v - 3N_1 + 16(1+v)}; \quad (10)$$

$$\alpha N_0 = \frac{16(N_1(1+3v_{eff}) + 2N_2(2v_{eff}^2 + v_{eff} - 1))}{(15 + 2N_2(1-4v_{eff}))(1+6v_{eff})}. \quad (11)$$

Теоретична оцінка за співвідношеннями (10) і (11) для різних пісковиків представлена в табл. 2.

Аналіз отриманих розрахунків вказує на неоднозначність характеру поведінки величини  $\alpha N_0$  у залежності від величини  $v$  ( $v_{eff}$ ) при визначених значеннях нормальної та тангенціальної податливостей. При цьому слід відмітити наступне, що отримані теоретичні оцінки величини  $\alpha N_0$  за співвідношеннями (10) і (11) для модельних пісковиків Navajo, Weber, Nugget вищі за розраховане значення за співвідношенням (9), а, відповідно, для пісковиків 1–4 нижчі. Отримані результати можна пояснити різним характером дефектів структури ряду пісковиків і їх взаємною орієнтацією в середовищі-матриці, обмеженістю модельних представлень тріщинуватого середовища роботи [9].

Наявність від'ємного значення  $v_{eff}$  для пісковика Weber можна розглянути на основі моделі контактів випадково упакованих сфер (або дисків у двовимірному просторі), де взаємодія відбувається в місці контакту за рахунок нормальної ( $f_n$ ) і тангенціальної ( $f_t$ ) сил. У такому випадку ефективний коефіцієнт Пуассона для тривимірного середовища дорівнює [10]

$$v_{eff} = \frac{1-\lambda}{4+\lambda}, \quad (12)$$

тоді як для двовимірного середовища дорівнює

$$v_{eff} = \frac{1-\lambda}{3+\lambda}, \quad (13)$$

де  $\lambda = \frac{k_t}{k_n}$ ,  $k_n$ , ( $k_t$ ) – нормальна й тангенціальна жорсткості, що пропорційні зміщенням від положення рівноваги для відповідних сил.

Вважаючи, що жорсткість обернено пропорційна податливостям, оцінка величини  $v_{eff}$  моделі за співвідношеннями (12) і (13) дають, відповідно, значення – 0,54 і –0,59, що значно менші в порівнянні з експериментом.

#### Висновки.

Отримані результати показують, що моделі дефектів структури неідеально-пружних мікронеоднорідних середовищ потребують модифікації для пояснення деформаційної поведінки реальних матеріалів.

Інтерпретація експериментальних даних швидкостей поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль, стосовно податливості дефектних структур неідеально-пружних гірських порід, вказує на адекватність розглянутої моделі мікронеоднорідного середовища.

Відношення податливостей для моделі мікронеоднорідного середовища може знаходитися в достатньо широких межах, визначаючи характер дефектів, їх концентрацію та орієнтацію в середовищі-матриці відносно напрямків поширення поздовжніх і поперечних акустичних хвиль.

Зі збільшенням ефективного коефіцієнта Пуассона зразків пісковиків відношення нормальної до тангенціальної податливості спадає.

Наявність від'ємного коефіцієнта Пуассона характеризується високою нормальною стисливістю по відношенню до тангенціальної із внеском контактних взаємодій.

Використаний модельний підхід може бути реалізований для моделювання зміни пружних модулів зі зміною концентрації дефектів при зовнішніх збуреннях у структурно-неоднорідній гірській породі.

#### Список літератури / References

1. Гольдин С.В. Распространение акустических волн в грунтах в условиях изменяющегося сдвигового напря-

жения (вплоть до разрушения образцов) / С.В. Гольдин, Ю.И. Колесников, С.В. Полозов // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 6. – С. 105–113.

Goldin, S.V., Kolesnikov, Yu.I. and Polozov, S.V. (1999), “Acoustic wave propagation in soils at varying shear stress (up to failure of specimens)”, *Physical Mesomechanics Journal*, Vol. 2, no. 6, pp. 105–113.

2. Извеков О.Я. Модель пористой среды с упругим трещиноватым скелетом / О.Я. Извеков, В.И. Кондауров // Физика земли. – 2009. – Т. 45. – № 4. – С. 31–42.

Izvekov, O.Ya. and Kondaurov, V.I. (2009), “Model of a porous medium with an elastic fractured skeleton”, *Izvestiya, Fizika Zemli*, Vol. 45, no. 4, pp. 31–42.

3. Капустянский С.М. Негололомная модель деформирования высокопористого песчаника при его внутреннем дроблении / С.М. Капустянский, В.Н. Николаевский, А.Г. Жиленков // Физика земли. – 2010. – Т. 46. – № 12. – С. 82–92.

Kapustyanskiy, S.M., Nikolaevskiy, V.N. and Zhilenkov, A.G. (2010), “Nonholonomic model of deformation of highly porous sandstone under its internal crushing”, *Izvestiya, Fizika Zemli*, Vol. 46, no. 12, pp. 1095–1104.

4. Никитин А.Н. Особенности распространения продольных и поперечных упругих волн в текстурированных горных породах / А.Н. Никитин, Т.И. Иванкина, В.К. Игнатович // Физика земли. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 57–69.

Nikitin, A.N., Ivankina, T.I. and Ignatovich, V.K. (2009), “The Wave Field Patterns of the Propagation of Longitudinal and Transverse Elastic Waves in Grain-Oriented Rocks”, *Izvestiya, Fizika Zemli*, Vol. 45, no. 5, pp. 424–436.

5. Вахненко В.О. Моделирование гистерезисного поведения пісковіку в умовах повільного циклічного навантаження / В.О. Вахненко // Геофізичний журнал – 2011. – Т. 33. – № 4. – С. 153–158.

Vakhnenko, V.O. (2011), “Simulation of hysteresis sandstone behavior in case of slow cyclic loading”, *Geofizicheskiy Zhurnal*, Vol. 33, no.4, pp. 153–158.

6. Zaitsev, V. And Sas, P. (2000), “Elastic moduli and dissipative properties of microinhomogeneous solids with isotropically oriented defects”, *Acustica-Acta Acustica*, Vol. 86, no. 2, pp. 216–228.

7. Експериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В.А. Машченко, О.О. Панчук, І.О. Садовенко, М.А. Бордюк // Вісник інженерної академії України. – 2012. – Вип. 3–4. – С. 60–64.

Mashchenko, V.A., Panchuk, O.O., Sadovenko, I.O. and Borduk, M.A. (2012), “Experimental device for measuring the elastic parameters of rocks”, *Bulletin of Engineering Academy of Ukraine*, Iss. 3–4, pp. 60–64.

8. Мавко, Г. (1994), “The relation between seismic P- and S- velocity dispersion in saturated rocks”, *Geophysics*, Vol. 59, no. 1, pp. 87–92.

9. Назаров В.Е. О коэффициенте Пуассона трещиноватых сред / В.Е. Назаров, А.М. Сутин // Акустический журнал. – 1995. – Т.41. – № 6. – С. 932–934.

Nazarov, V.E. and Sutin, A.M. (1995), “Poisson’s ratio of cracked media”, *Akusticheskiy Zhurnal*, Vol. 41, no. 6, pp. 932–934.

10. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор) / Д.А. Конёк, К.В. Войцеховски, Ю.М. Плескачевский, С.В. Шилько // Механика композитных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 35–69.

Koniok, D.A., Voitsekhovskiy, K.V., Pleskachevskiy, Yu.M. and Shilko, S.V. (2004), "Materials with negative Poisson's ratio. (The review)", *Mekhanika kompozitnykh materialov i konstruksyy*, Vol. 10, no. 1, pp. 35–69.

11. Анализ структуры угольного пласта методом акустической геолокации / А.Н. Шашенко, В.Н. Журавлев, Е.В. Масленников М.С. Дубицкая / Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 3. – С. 65–71.

Shashenko, A.N., Zhuravlev, V.N., Maslennikov, Ye.V., Dubitskaya, M.S. (2013), "Analysis of coal bend structure by the method of acoustic geolocation", *Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychoho Universytetu*, no. 3, pp. 65–71.

**Цель.** На основании модельного подхода и интерпретации экспериментальных данных скоростей распространения продольных и поперечных акустических волн проанализировать влияния структурно-морфологических и упругих характеристик дефектов на особенности деформации ряда песчаников.

**Методика.** Включала проведение серии экспериментальных исследований плотности, пористости и определения скоростей распространения продольных и поперечных акустических волн в образцах песчаников с различной структурной организацией.

**Результаты.** По скоростям распространения продольных и поперечных волн для песчаников с различными значениями эффективного коэффициента Пуассона определены упругие параметры дефектности структуры. Проведен сравнительный анализ отношения нормальной и тангенциальной составляющих деформации с эффективным коэффициентом Пуассона песчаников. На основании вариации скоростей распространения акустических волн под действием внешнего давления произведен расчет коэффициента Пуассона среды-матрицы.

**Научная новизна.** Рассмотрено деформационное поведение песчаников на основании модели микронеоднородной среды в виде упругой матрицы и планарных дефектов включений. Теоретические оценки параметров дефектов, на основании упругих постоянных линейной теории упругости, указывают на адекватность использования модели для описания деформированного состояния неидеально-упругих горных пород. Обоснована возможность существования отрицательного коэффициента Пуассона у песчаников с высокой нормальной сжимаемостью и вкладом контактных взаимодействий.

**Практическая значимость.** Разработана методика исследования особенностей деформированного состояния неидеально-упругих горных пород методами неразрушающего контроля. Получены соотношения для оценки нормальной и тангенци-

альной податливости на основании эффективных модулей упругости микронеоднородной среды, модулей упругости и коэффициента Пуассона среды-матрицы. Показано, что между концентрациями дефектов, их податливостями и эффективным коэффициентом Пуассона, определяющим деформационно-упругие характеристики среды, существует обратная зависимость.

**Ключевые слова:** микронеоднородная среда, упругие параметры, коэффициент Пуассона, продольная и поперечная акустические волны, скорость распространения, песчаник

**Purpose.** To analyze the influence of structural and morphological, and elastic characteristics of defects on the features of the structure and deformation of some sandstones based on the modeling approach and interpretation of experimental data of velocity of longitudinal and transverse acoustic waves.

**Methodology.** We have involved a series of experimental studies of density, porosity, and determination of the velocity of propagation of longitudinal and transverse acoustic waves in samples of sandstone with different structural organization.

**Findings.** The elastic parameters of defects of solid structure were calculated based on the velocities of propagation of acoustic waves for sandstones with different effective Poisson's ratio. The normal and tangential compliances with the effective Poisson's ratio of sandstone were comparatively analyzed. Poisson's ratio of the medium matrix was calculated based on the variations of the velocities of propagation of acoustic waves under the influence of external pressure.

**Originality.** The deformation behavior of sandstones was considered on the basis of the model of microinhomogeneous medium as an elastic matrix and planar defects inclusions. Theoretical estimates of the parameters of defects, based on the elastic constants of linear elasticity theory, indicate the adequacy of the model to describe the strain state of imperfectly elastic rock. The possibility of the existence of negative Poisson's ratio in sandstones with high normal compressibility and the contribution of the contact interactions were theoretically justified.

**Practical value.** Theoretical estimates of the parameters of defects, based on the elastic constants of linear elasticity theory, indicate the adequacy of the model to describe the strain state of imperfectly elastic rock. There were obtained the relations for evaluation of normal and tangential compliance on the basis of effective elastic moduli microinhomogeneous medium, elastic moduli and the Poisson's ratio of the matrix medium. It is shown that the concentrations of defects in their compliance and effective Poisson's ratio have an inverse relationship, which determines the strain-elastic properties of the medium of propagation of acoustic waves.

**Keywords:** microinhomogeneous medium, elastic parameters, Poisson's ratio, longitudinal and transverse acoustic waves, propagation velocity, sandstone

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Д.В. Рудаковим. Дата надходження рукопису 17.10.13.*