

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.552.53.553

Б. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.

E-mail: maslov@inmech.kiev.ua,

І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

E-mail: oivan@univ.kiev.ua,

А. Шинкаренко, асп.

E-mail: anastasiia.nesterenko@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, УкраїнаМОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ТЕРИГЕННО-ВАПНЯКОВИСТИХ ПІСКОВИКІВ*(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)*

Проведено дослідження керну теригенно-вапняковистих пісковиків з метою визначення структури тріщинно-порового простору, петрофізичних властивостей та подальшої статистичної обробки отриманих даних. Використано обладнання петрофізичної лабораторії ННІ "Інститут геології", що дозволило провести експерименти в умовах змінного зовнішнього тиску для підтвердження гіпотези про суттєво нелінійну поведінку пористого пісковика, залежну від амплітуди та знаку зовнішнього навантаження. Зроблено аналіз літературних джерел, присвячених моделюванню поведінки флюїдонасичених пористих пісковиків та прогнозуванню їх фізико-механічних характеристик. В якості базового для подальшого розв'язання обрано варіант моделі нелінійного в'язко-пружного пористого середовища типу Біо. Наявність в'язкої рідини суттєво впливає на реакцію середовища як при поступовій зміні тиску, так і при періодичних зовнішніх впливах. Використано попередні роботи авторів по темі дослідження, в тому числі застосовано визначальні рівняння стану із дробово-експоненційними функціями повзучості та релаксації.

Для оцінки параметрів проникності зразків вапнякових пісковиків запропоновано мікроструктурний підхід до аналізу еквівалентних характеристик масопереносу в ізотропному пористому в'язко-пружному середовищі. Ключовим моментом є застосування інтегральних перетворень Лапласа-Карсона для дослідження в'язких ефектів та Фур'є – при аналізі складної, багаторівневої мікроструктури.

Отримано аналітичні вирази для прогнозу в'язко-пружних функцій повзучості та релаксації та викладено алгоритм розв'язку, який включає чисельний аналіз як важливу складову у випадках багатокомпонентного середовища із складною мікроструктурою.

Ключові слова: структура пустотного простору, в'язко-пружна поведінка, повзучість, проникність.

Вступ. Моделювання фізико-механічної поведінки багатофазних середовищ являє собою актуальну задачу геофізики, особливо це стосується теоретичного обґрунтування підходів до вдосконалення методики побудови мікромеханічних моделей пористого середовища з рідиною та сумішею складної реології. Аналіз сучасного стану проблеми побудови розрахункових нелінійних моделей багатофазних геологічних середовищ [1, 3, 8, 14] свідчить про, з одного боку, перспективність напрямку, з іншого, недостатню увагу до застосування саме нелінійної реології. Слід зазначити, що постановка задачі в пружній лінійній та нелінійній областях запроваджена в роботах [3, 5, 6, 8]. В той же час, аналіз деформацій повзучості, руйнування, та, як результат, зміни параметрів проникності потребує подальшої уваги. Одночасно існує необхідність розробки методик ідентифікації параметрів повзучості [11] та проникності багатофазного пористого середовища та алгоритмів прогнозування на основі запропонованих теоретичних підходів.

Згідно нової наукової парадигми геофізики, презентованої в [5], флюїдонасичене геологічне середовище розглядається як нелінійна багатокомпонентна тріщинувата геосистема. Ієрархічно-підлеглі компоненти цієї геосистеми дискретно заповнюють геологічний простір і постійно знаходяться в напружено-деформованому стані, що спонукає неперервний процес повзучості. Фрагментація середовища на блоки і комірки відображає як процеси релаксації напружень при внутрішніх і зовнішніх енергообмінних процесах, так і особливості пружного та в'язкопружного деформування при різному термодинамічному та флюїдо-газовому режимі. Структурні елементи геологічного середовища не можуть витримувати протягом значного часу сталі напруження, навіть якщо вони далекі від критичних. Це означає, що механічні пошкодження геологічного середовища є одними з найбільш характерних і важливих його ознак [5, 9, 14]. Як зазначено в [8, 10, 14], процеси відкриття і закриття мікро- і макротріщин є наслідком релаксації напружень у поров'язкопружному середовищі. При цьому релаксація зовнішніх напружень, гідростатичного тиску найефективніше здійснюється шляхом розкриття і закриття тріщин, які, в свою чергу, змінюють проникність се-

редовища для флюїдів і газів, що, в результаті, безпосередньо впливає на внутрішні напруження та внутрішньопоровий тиск. Проведені лабораторні дослідження структури тріщинно-порового простору теригенних пісковиків показали [1, 2, 4], що тріщини найкраще апроксимуються еліпсоїдом обертання різних форматів α , де $\alpha = \frac{c}{a}$, c – піввісь еліпсоїда вздовж осі обертання, a – піввісь, перпендикулярна до осі обертання. Концентрація мікротріщин c_p (коефіцієнт тріщинної пористості) визначається співвідношенням $c_p = \frac{4}{3} \pi a^3 \alpha \bar{N}$, де \bar{N} – кількість мікротріщин в одиниці об'єму.

Як зазначено в [5, 8, 9, 11], кожному конкретному виду механічних рухів відповідає і свій специфічний масштабний рівень в блокувній ієрархії, що відображається в макроструктурі, мезоструктурі та мікроструктурі. Якщо роль механічних рухів на макрорівні досить добре вивчена (сейсмічні хвилі, повзучість середовища, квазіпластичні течії), то роль механічних рухів на мезо- і мікрорівні менш усвідомлена (макро- і мікротріщини, руйнування). Поведінка складнопобудованих флюїдонасичених матеріалів при руйнівних напруженнях розглядається з точки зору нового напрямку механіки – фізичної мікромеханіки [5, 7, 14]. Зв'язок фізичної механіки з широким класом процесів деструкції в літосфері розглядався в [5, 7, 15].

Як відомо, критеріями при виділенні колекторів слугують коефіцієнти глинистості та пористості. Важливе місце для оцінки тріщинуватості має акустичний каротаж, при інтерпретації якого відмічено значне затухання амплітуд і зростання інтервального часу пробігу на тріщинуватих ділянках [9, 10]. Це, в першу чергу, свідчить про наявність в'язкої складової у загальній деформації середовища та вимагає застосування моделі в'язкопружної поведінки для аналізу фізико-механічних властивостей пористого середовища.

При ширококутовому каротажі використовується повний хвильовий пакет, отже є можливість окремо визначати коефіцієнти тріщинуватості та кавернозності за даними

ефективної стискуваності колектора, матриці та тріщин. Очевидно, необхідним є створення нових чисельно-аналітичних методів розрахунку ефективних в'язкопружних параметрів [10, 12] колекторів зі спектром хаотично орієнтованих пустот різних форматів, як це було раніше зроблено для складнобудованих пружних колекторів [2, 4, 15]. Це також пов'язано із тим, що серед опосередкованих методів найбільш інформативними є акустичні, що базуються на дослідженні залежностей швидкостей поширення пружних хвиль від ємності пустотного простору, форми окремих пустот, орієнтації мікротріщин тощо. Цілоком природним є розвинення цього підходу для випадку існування суттєвих проявів в'язких ефектів, особливо у флюїдонасичених структурах, коли застосування ідеально пружних моделей не може описати ключові ефекти затухання та дисперсії. Моделювання резонансних властивостей в'язкопружних ґрунтів дозволяють на етапі проєктування вносити зміни у власні періоди коливань відповідальних конструкцій для уникнення резонансних ефектів [8, 10, 14].

Комплексні петрофізичні дослідження в рамках моделі в'язкопружного середовища дають можливість більш достовірного визначення фізичних властивостей зразків, еволюцію акустичних параметрів в умовах високих тисків. Принципово складною проблемою є, безумовно, відокремлення внесків впливу різних типів пористості на загальні, зведені характеристики. На думку авторів, найбільш перспективним у цьому напрямку є застосування саме в'язкопружної моделі середовища із подальшим аналізом реакції складнобудованої геологічної структури на збурення з різними частотами, при цьому перспективним є використання як акустичних, так і електромагнітних полів [15]. Постановка задачі в пружній моделі не надає можливості виявити саме частотну залежність поведінки пористого флюїдонасиченого середовища від частоти та форми збуджуючого імпульсу. Комплексний аналіз результатів досліджень акустичних властивостей в умовах змінних тисків надає можливість якісно визначити особливості структури пустотного простору порід.

У проведених лабораторних експериментах на зразках теригенно-вапняковистих пісковиків встановлено [1, 4, 15], що механічна деформація породи поєднується із тиском рідини в поровому просторі. Рідина протікає крізь породу, реагуючи на градієнти порового тиску, але також може протікати через зміни макроскопічних напружень з природних причин, таких як тектонічні сили, та техногенних причин, таких як буріння свердловин і т.д. Отже, механічна і гідрологічна поведінка гірської породи повністю пов'язані між собою. Більшість досліджень проблем механіки гірських порід, а також проблеми підземного потоку, ігнорували цей зв'язок. Зокрема, велика частина досліджень з проблем підповерхневої течії в області гідрології, нафтового машинобудування проводиться з припущенням, що гірська маса є пористою, але повністю жорсткою. Аналогічним чином, в дослідженнях з геофізики пористих середовищ часто використовується аналіз, де ігнорується ефект рідини в порах, або припускається, що поровий тиск можна знайти незалежно від механічної деформації. Хоча такі припущення часто прийнятні, але існують ситуації, в яких зв'язок між деформацією і поровим тиском рідини [1, 4] та потоком рідини повинен бути врахований. Наприклад, ефект порового тиску відіграє важливу роль в деформації навколо свердловини, при моделюванні гідравлічного розвитку пласта свердловин [14].

Крихкому руйнуванню передують інтенсивні пластичні процеси – фронти дефектності, які поширюються від кінців мікротріщин і готують геологічне середовище до руйнування. Рухи і деформації пористого середовища приводять в подальшому до розривних порушень з раптовим вивільненням пружної енергії [7]. Експерименти з руйнування гірських порід при циклічних впливах підтверджують факт зародження різного типу мікропошкодження і подальшого розвитку домінантної тріщини, яка і є причиною створення вогнища землетрусу, виникнення розлому.

Окрім урахування взаємозв'язку між різними проявами впливу навантаження на породу, важливо також брати до уваги внутрішню будову гірської породи, зокрема, характеристики її пустотного (тріщинно-порового) простору. Характер розподілу та взаємодії пустот має визначальне значення для визначення проникності породи та її поведінки в умовах стискування. У роботах [1, 2] розглядається модель складнобудованого колектора, який складається з суцільної непроникної матриці, наповненої хаотично орієнтованими пустотами різних форматів. У роботах [3-5] пропонується розглядати геологічну породу як середовище з подвійною пористістю та подвійною проникністю (низькопроникна накопичувальна пористість та високопроникна транспортуюча пористість), що дає кращу можливість враховувати особливості тріщинно-порового простору породи, а також параметри флюїду, що її насичує.

Постановка проблеми. Стаття присвячена апробації нового підходу до чисельно-аналітичного моделювання ефективних фізико-механічних властивостей флюїдонасиченої породи з урахуванням її складної мікроструктури. Модель базується на використанні фундаментальних співвідношень механіки в'язкопружного суцільного середовища, інтегральних перетворень Фур'є (FT) та Лапласа-Карсона (LC) із застосуванням відповідних чисельних алгоритмів [12, 13]. Розглядається клас гірських порід з мікроструктурою, яка може бути представлена неперервною матричною фазою, в яку вміщено мінеральні включення та пори різного формату. Одна або кілька складових фаз можуть демонструвати нелінійну поведінку [3, 12, 14], наявність гістерезису та ін.

Як типову структуру для подальшого аналізу розглянемо теригенну породу, яка складається з глинистої в'язкопружної матриці, в яку вкраплені лінійно пружні зерна кварцу і кальциту, та яка містить різно-форматний тріщинно-поровий простір. Така схематизація дозволяє подальше додаткове розширення шляхом включення прогресивного процесу накопичення пошкоджень через зростання мікротріщин [5]. У роботі наведено результати порівняння отриманих чисельних результатів та лабораторних експериментальних даних, зроблено висновки про оцінку достовірності запропонованої чисельно-аналітичної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Руйнування гірської породи часто розглядають як процес, ізолюваний від передуючої йому непружної деформації. Зокрема, у роботах [1, 2, 15], під час аналізу зміни швидкостей поздовжніх хвиль та питомого електричного опору порід під впливом нарощування та зниження всебічного тиску, використовуються дані про розподіл у породі пустот різних форматів, однак при цьому не враховується вплив в'язко-пластичних деформацій, що передують руйнуванню у породі. У роботі [6] зміну електричних параметрів породи при збільшенні навантаження на неї пояснюють деформаціїми пустотного простору: закриттям мікротріщин, скороченням та закриттям провідних каналів. У роботі [7] пропонується описувати процес деформації та руйнування з точки зору фізичної мезомеханіки матеріалів. У рамках такого підходу на кожному масштабному рівні мікро-, мезо- і макрозадача локального руйнування може вирішуватися у відповідності до специфічних механізмів непружної деформації, що передують руйнуванню.

Також під час дослідження гірських порід потрібно враховувати їх анізотропію та нелінійність поведінки. У роботі [6] проведено визначення впливу структури тріщинно-порового простору породи на її пружні властивості з урахуванням різних форматів пустот та їх водонасичення. Встановлено, що зміна форматів пустот чи флюїду, що насичує породу, веде до суттєвих змін її пружних властивостей [4, 8].

Родовища нафти і природного газу найчастіше пов'язують із підняттями або складками пластів теригенних і карбонатних осадових порід (пісковиків, вапняків, алевролітів, глин), що представляють собою скупчення зерен мінералів,

цементуючого матричного матеріалу, перетворених в результаті геологічних процесів. Поровий простір теригенних порід являє собою складну нерегулярну систему сполучених або ізольованих міжзернових пустот з розмірами пор, що складають одиниці або десятки мікрометрів.

У карбонатних породах (вапняках, доломітах) система пор більш неоднорідна, крім того, набагато більш розвинена система вторинних пустот, що виникли після утворення самої породи. Сюди відносяться тріщини, викликані тектонічними напругами, а також канали і каверни, які виникли завдяки розчиненню скелета породи водою. Протяжність тріщин і розміри каверн можуть набагато перевищувати розміри первинних пор. З цих фактів випливають особливості теорії фільтрації нафти і газу в природних пластах. Одна з них полягає у необхідності одночасно розглядати процеси в областях, характерні розміри яких розрізняються на порядки: розмір пор (одиниці і десятки мікрометрів), діаметр свердловин (десятки сантиметрів), товщини пластів (одиниці і десятки метрів), відстані між свердловинами (сотні метрів), протяжність родовищ (до десятків і навіть сотень кілометрів). Крім того, неоднорідність пластів (по товщині і площі) має характерні розміри практично будь-якого масштабу.

Складний і нерегулярний характер структури порового простору не дозволяє вивчати рух рідини і газів у ньому звичайними методами гідродинаміки, тобто шляхом розв'язку рівняння руху в'язкої рідини для області, яка представляє собою сукупність всіх пор. Проста оцінка показує, що для побудови такого рішення неможливо записати граничні умови навіть для невеликого родовища. Однак у такому записі і такому рішенні немає необхідності: зі збільшенням числа окремих мікрорухів, що становлять макроскопічний фільтраційний рух, починають проявлятися сумарні статистичні закономірності, характерні для руху в цілому і несправедливі для одного або декількох порових каналів. Це характерно для систем з великим числом однорідних елементів, слабо пов'язаних між собою [9, 14]. Такі системи можуть бути описані як деякі суцільні середовища, властивості яких не виражаються безпосередньо через властивості складових елементів, а є усередненими характеристиками досить великих обсягів середовища.

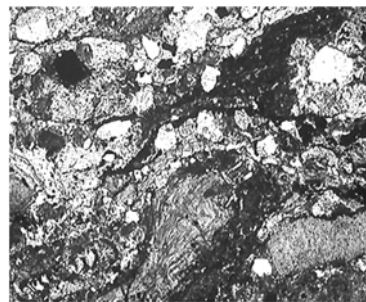
Аналогічно цьому теорія фільтрації будується на уявленні про те, що пористе середовище і заповнююча його рідина утворюють суцільне середовище. Це означає, що елементи системи рідина – пористе середовище, які вважаються фізично нескінченно малими, все ж досить великі у порівнянні із розмірами пор і зерен пористого середовища. Для математичного моделювання проникності гірських порід необхідно мати інформацію стосовно параметрів фільтруючих каналів, а саме: розмірів пустот, їх зв'язаності та особливостей взаємодії з флюїдом, що фільтрується. У роботах [2, 3] для визначення перспективності порід-колекторів пропонується визначати кількісний розподіл пустот різних форматів, які надалі можна використовувати для розрахунків проникності. У роботах [4, 5] для визначення проникності порід пропонується розділення породи на дві фази, одна з яких є слабопроникною і містить пустоти, які можуть акумулювати флюїд, а інша є високопроникною і її пустоти відповідають за транспорт флюїдів. Такий підхід дозволяє враховувати наявність у породі різних породоутворюючих компонент та різних типів взаємозв'язку між ними.

Метою роботи є проведення мікомеханічного моделювання в'язко-пружних властивостей та оцінки проникності вапнякових пісковиків з можливим подальшим використанням результатів досліджень при оцінці перспективності порід-колекторів.

Методика та об'єкт досліджень. Лабораторні зразки теригенно-вапняковистих пісковиків, що досліджувались, являють собою складноорганізовану структуру. Як головну особливість можна відзначити відносно низьку проникність та високу механічну міцність. Склад порід загалом залежить від глибини залягання зразка, але зазвичай містить три основні фази: карбонатно-глинисту матрицю, зерна кварцу та польових шпатів, зерна кальциту та силікатів. Загальну картину структури досліджених зразків можна уявити з рис. 1. Найбільш поширений мінералогічний склад характеризується: вмістом уламкового матеріалу від 40 до 50% (зерна кварцу і польових шпатів), від 20 до 30% кальциту і 20 – 25% цементу. Існує також невелика кількість інших мінералів, таких як пірит, слюда, доломіт, гіпс та ін.



а



б

Рис.1. Приклад плашки керну (а), з якого вирізаний зразок вапняковистого пісковика та шліф зразка (розмір кадру – 9,8 x 13,6 мм) (б)

Як впливає зі статистичної обробки шліфів зразків [1, 2], мікроструктура теригенно-вапняковистих пісковиків неоднорідна в різних масштабах. Тому має сенс застосування мікро- та макро моделювання механічних властивостей у різних масштабах. Так, наприклад, у нано-метрових (nm) і мікронних масштабах (μm), глинисті мінерали мають складну організацію структури з декількома шкалами характерних розмірів (включення, частинки). Розмір пор змінюється від нанометра до десятків міліметрів і, відповідно, можна виділити пустоти доволі складної форми. Так було виявлено, що пустоти теригенно-вапняковистих пісковиків мають два репрезентативних середніх розміри,

4 nm і 10 μm . Загальна пористість може також змінюватися в залежності від глибини залягання зразка. У мезоскопічному масштабі досліджуваний матеріал складається із зерен кварцу і кальциту, впроваджених в глинисту в'язко-пружну матрицю. На макрорівні теригенно-вапняковий пісок зазвичай складається із мінеральних зерен та глинистої матриці і його можна розглядати як еквівалентне гомогенне середовище.

В даній роботі, для простоти, мікро-механічне моделювання виконуємо в мезоскопічному масштабі. Мінеральна матриця розглядається як однорідний континуум, фізико-механічна поведінка якого описується відповідною в'язкопружною моделлю [10, 12]. Таким чином, в

першому наближенні, вапняковистий пісковик в мезоскопічній шкалі розглядається як система матриця-включення. Глинисті мінерали являють собою матричну фазу, які підкріплені зернами кальциту і кварцу.

Будемо вважати, що елементарна комірка матеріалу піддається однорідній макроскопічній деформації на границі [3, 5]. У зв'язку з гетерогенністю матеріалу, локальні поля напружень і деформацій є суттєво неоднорідними. Поле деформацій визначається середнім та полем флуктуацій зміщень.

Співвідношення між деформаціями та напруженнями для неоднорідного геологічного середовища, що деформується у в'язкопружній області, запишемо у вигляді [10,11]:

$$\begin{aligned} \mathbf{e} &= (\mathbf{C} + \mathbf{D}(s))\sigma, & \sigma &= (\mathbf{E} - \mathbf{G}(p))\mathbf{e}, \\ p &= \left(\frac{2}{3} \mathbf{e}^d \cdot \mathbf{e}^d\right)^{1/2}, & s &= \left(\frac{3}{2} \sigma^d \cdot \sigma^d\right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (1)$$

де \mathbf{e} та σ , відповідно, тензор деформацій та тензор напружень; символами $\mathbf{J}, \mathbf{D}(s)$ та $\mathbf{E}, \mathbf{G}(p)$ позначено, відповідно, тензор податності (повзучості) та тензор пружності (релаксації) матеріалу. Девіатори деформацій та напружень позначено як \mathbf{e}^d та σ^d , гідростатичні складові e^h та s^h , тобто

$$\hat{\mathbf{e}}(z) = (\hat{\mathbf{C}}(z) + \hat{\mathbf{D}}(s, z))\hat{\sigma}(z), \quad \hat{\sigma}(z) = (\hat{\mathbf{E}}(z) - \hat{\mathbf{G}}(p, z))\hat{\mathbf{e}}(z), \quad (5)$$

де символом шапочки позначено трансформовані функції в область змінних Карсона, тут z змінна перетворення.

Перше та друге співвідношення (3) є взаємозалежними. Це можна показати, застосувавши перетворення (4). Виходячи з рівнянь (3) та (5), отримуємо наступні співвідношення відповідності, що є справедливими у лінійному випадку:

$$\hat{\mathbf{E}}(z)\hat{\mathbf{C}}(z) = \hat{\mathbf{C}}(z)\hat{\mathbf{E}}(z) = \mathbf{I}, \quad (6)$$

де \mathbf{I} – одиничний тензор четвертого рангу. Варто відмітити корисну особливість перетворення (4), яке зберігає фізичну розмірність оригінальної функції. Це робить (5) математично аналогічними до (1). Такої відповідності не існує при використанні перетворення Лапласа [10].

Як показано в [5, 12], розв'язок крайової задачі в рівняннях (3), (6) можна виразити в просторі Фур'є в термінах оператора Гріна четвертого порядку $\hat{\Gamma}^0(\xi)$:

$$\hat{\mathbf{e}}(\xi) = -\hat{\Gamma}^0(\xi) \cdot \tau(\xi), \quad \hat{\mathbf{e}}(0) = \bar{\mathbf{e}}, \quad (7)$$

де верхній індекс шапочки означає фізичне поле, трансформоване в просторі Фур'є, а ξ представляє координати в просторі Фур'є. Граничні умови рівнянь (5) автоматично виконуються при такому представленні завдяки періодичним властивостям перетворення Фур'є. Якщо початкову пружність \mathbf{L}^0 при побудові розв'язку вибирати ізотропною з двома параметрами Ламе, λ^0 і μ^0 , то функція $\mathbf{G}(\xi)$ Гріна в просторі Фур'є може бути виражена в явному вигляді наступним чином [3]

$$\mathbf{G}_{ij}(\xi) = \frac{1}{\mu^0} \left(\frac{\delta_{ij}}{\xi^2} - \frac{\lambda^0 + \mu^0}{\lambda^0 + 2\mu^0} \frac{\xi_i \xi_j}{\xi^4} \right). \quad (8)$$

Отже

$$\begin{aligned} \hat{\Gamma}_{ijkl}^0(\xi) &= \frac{1}{4\mu^0 \xi^2} (\delta_{ik} \xi_j \xi_l + \delta_{il} \xi_j \xi_k + \delta_{jk} \xi_i \xi_l + \delta_{jl} \xi_i \xi_k) - \\ &\quad - \frac{\lambda^0 + \mu^0}{(\lambda^0 + 2\mu^0) \mu^0 \xi^4} \xi_i \xi_j \xi_k \xi_l. \end{aligned} \quad (9)$$

Теоретично, параметри Ламе λ^0 і μ^0 можуть бути обрані довільно. Проте, невдалий вибір цих параметрів може значно зменшити швидкість збіжності розрахункового алгоритму. На підставі проведених чисельних експериментів обираємо емпіричне значення для початкових параметрів, які забезпечують прийнятну швидкість збіжності

$$\begin{aligned} \mathbf{e}^d &= \mathbf{e} - e^h \mathbf{1}, & e^h &= \frac{1}{3} \text{tr}(\mathbf{e}), \\ \sigma^d &= \sigma - s^h \mathbf{1}, & s^h &= \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma). \end{aligned} \quad (2)$$

У випадку в'язкопружного деформування, викликаного наявністю в'язкої рідини у тріщинно-поровому просторі, можна записати аналогічні рівняння стану у вигляді [5, 12]:

$$\mathbf{e}(t) = \int_0^t (\mathbf{C}(t-t_1) + \mathbf{D}(s, t-t_1)) \dot{\sigma}(t_1) dt_1, \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t (\mathbf{E}(t-t_1) - \mathbf{G}(p, t-t_1)) \dot{\mathbf{e}}(t_1) dt_1,$$

де крапка над символом означає дифференціювання по змінній часу t , а підінтегральні функції $\mathbf{C}(t), \mathbf{D}(s, t)$ та $\mathbf{E}(t), \mathbf{G}(p, t)$ являють собою тензори повзучості та тензори релаксації напружень першого і другого порядків, відповідно.

Якщо $\mathbf{E}(t), \mathbf{G}(p, t)$ та $\mathbf{C}(t), \mathbf{D}(s, t)$ є гладкими функціями змінної t , то можна застосувати перетворення Лапласа-Карсона [10, 13]:

$$LC\{f(t)\} = \hat{f}(z) = z \int_0^\infty e^{-zt} f(t) dt \quad (4)$$

до (2) та (3), в результаті чого отримуємо:

$$\mu^0 = \frac{1}{2} [\text{inf}(\mu(\mathbf{z})) + \text{sup}(\mu(\mathbf{z}))], \quad z \in \Omega_z. \quad (10)$$

Аналогічно для параметру λ^0 .

Визначальні рівняння поров'язкопружності флюїдонасиченого середовища. Теорія поров'язкопружності була розроблена для випадку гідростатичного навантаження [10]. Для того, щоб розвинути цю теорію на випадок залежного від часу деформування, розглянемо пористу в'язкопружну породу. Макроскопічний репрезентативний об'єм породи позначимо V_b , об'єм порового простору – V_p , а об'єм твердого багатофазного мінерального компоненту – V_m , тобто вважаємо

$$V_b = V_m + V_p. \quad (11)$$

Відносна кількість пустот і твердого компонента, тобто коефіцієнт пустотності, може бути визначений кількісно або за допомогою пористості c_p , яка розраховується

$$c_p = V_p / V_b, \quad (12)$$

відносну пористість мінеральної фази позначимо

$$c_{pm} = V_p / V_m = \frac{c_p}{1 - c_p}. \quad (13)$$

Пористість, таким чином, є обмеженою величиною за визначенням (12) в діапазоні $0 < c_p < 1$, в той час як коефіцієнт пустотності (13) може приймати будь-яке значення. Нехай зразок пористої породи піддається зовні чисто нормальному тиску величини P_c , де індекс c означає зовнішній тиск, а внутрішні стінки пор піддаються поровому тиску величини P_p , що чиниться поровою рідиною. Оскільки порова рідина не може витримати напругу зсуву при статичних умовах, то і напруги зсуву не можуть бути передані стінками пор. Отже існують два незалежних тиски, що діють на мінеральний каркас і два незалежних об'єми (V_b, V_p), і звідси можна визначити чотири типи стисливості, одна з яких, наприклад

$$C_{bc} = -\frac{1}{V_b} \left(\frac{\partial V_b}{\partial P_c} \right)_{P_p}; \quad (14)$$

де верхній індекс i позначає початкове значення параметру у ненапруженому стані. Приріст об'ємної деформації можна виразити через стисливість пористої породи наступним чином:

$$de_b = -\frac{\partial V_b}{V_b^i} = C_{bc}dP_c - C_{bp}dP_p \quad (15)$$

Зв'язок між чотирма стисливостями пористої породи може бути отриманий в припущенні, що матриця може розглядатися як ізотропний, однорідний в'язкопружний матеріал. Це припущення можна вважати виправданим завдяки тому факту, що, хоча матриця пісковика складається з декількох породоутворюючих мінералів [1, 2], їх еквівалентні фізичні характеристики внаслідок хаотичної розорієнтації включень мало відрізняються від ізотропних.

Запишемо ще одне співвідношення між двома типами стисливості, що характеризує зовнішній та внутрішньопоровий тиск

$$C_{pp} = C_{pc} - C_m \quad (16)$$

Практична значимість (16) полягає в тому, що хоча стисливість пористого пісковика може змінюватися в залежності від P_p і P_c , фізичні властивості насправді залежать тільки від одного параметра $P_d = P_c - P_p$, який відомий як диференціальний тиск. Причина цього полягає в тому, що залежність напруги від стисливості обумовлена закриттям тріщин, утворенням міжзернових контактів або інших процесів, які включають закриття тонких, тріщиноподібних розривів, і поровий тиск має по суті рівний, але протилежний вплив на деформації тонкої оболонки порожнини. Залежність стисливості від диференціальної напруги є також необхідною умовою для того, щоб об'ємна деформація не залежала від шляху навантаження у просторі напружень [14].

Розглянутий лабораторний зразок пісковика має пористість $c_p = 0.085$, стисливість мінерального каркасу $C_m = 0.286 \cdot 10^{-4}, MPa^{-1}$, об'ємна стисливість флюїдонасиченої частини $C_{bc} = 1.31 \cdot 10^{-4}, MPa^{-1}$, і стисливість пор $C_{pp} = 11.8 \cdot 10^{-4}, MPa^{-1}$. Якщо пори заповнені повітрям при атмосферному тиску, яке має стисливість $C_f = 9.87, MPa^{-1}$, то недренована об'ємна стисливість також буде дорівнювати $C_{bc} = 1.31 \cdot 10^{-4}, MPa^{-1}$. Якщо ж порода насичена водою, яка має стисливість $C_f = 5.0 \cdot 10^{-4}, MPa^{-1}$, то недренована об'ємна стисливість буде $C_{bc} = 0.573 \cdot 10^{-4}, MPa^{-1}$.

В ізотропному в'язкопружному пористому середовищі вплив внутрішньопорового тиску можна врахувати, викорставши визначальне рівняння Біо [10]

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2G} \boldsymbol{\sigma} - \frac{3\nu}{2G(1+\nu)} \sigma^h \mathbf{1} - \frac{\alpha}{3K} P_p \mathbf{1}. \quad (17)$$

Тут \mathbf{e} – тензор деформацій, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напружень, G – модуль зсуву, ν – коефіцієнт Пуассона, K – модуль об'ємного стиску, $\sigma^h = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$ – гідростатична складова напружень, α – коефіцієнт Біо, який визначається

$$\alpha = 1 - \frac{C_m}{C_{bc}} = 1 - \frac{K_{bc}}{K_m} = 1 - \frac{K}{K_m} \quad (18)$$

Оскільки коефіцієнт взаємодії Біо завжди задовольняє нерівності $\alpha < 1$, то поровий тиск лише частково врівноважує зовнішній тиск, тому його називають також коефіцієнтом ефективних напружень, які позначимо \mathbf{s} . Тоді рівняння стану запишемо у вигляді

$$\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - \alpha P_p \mathbf{1} = \mathbf{E} \mathbf{e}, \quad (19)$$

звідки для об'ємної деформації

$$e_b = \frac{3(1-2\nu)}{2G(1+\nu)} \sigma^h - \frac{\alpha}{K} P_p. \quad (20)$$

Значимо, що пористість і проникність, як скалярні величини, можуть залежати тільки від інваріантів тензора ефективних напружень [5].

Рівняння (17) зручно записати відносно девіаторів та гідростатичної складової

$$\mathbf{e}^d = \frac{1}{2G} \boldsymbol{\sigma}^d, \quad e^h = \frac{1}{3K} \sigma^h - \frac{\alpha}{3K} P_p \quad (21)$$

тоді має сенс розглянути змінну ζ , яка характеризує ту частину об'єму рідини, яка пов'язана з переносом маси

$$d\zeta = -\frac{\alpha}{K} (dP_c - \frac{1}{B} dP_p) \quad (22)$$

Якщо обмежитись лінійною моделлю переносу, то отримаємо спрощене співвідношення

$$\zeta = -\frac{\alpha}{K} (P_c - \frac{1}{B} P_p) \quad (23)$$

Змінна ζ характеризує перенос рідини в пористому середовищі та задовольняє рівнянню

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0. \quad (24)$$

Воно має бути доповненим рівнянням стану, рівнянням Дарсі

$$\mathbf{q} = -\frac{\mathbf{k}}{\eta} \nabla (P_p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}), \quad (25)$$

тут \mathbf{k} – тензор проникності, η – в'язкість рідини (для води $\eta = 0.001 Pa \cdot s$, в'язкість розчинів гідрокарбонів на порядки більше), \mathbf{g} – прискорення тяжіння.

Отже, для ізотропного середовища отримаємо

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{k}{\eta S} \Delta \zeta, \quad (26)$$

тут S – коефіцієнт насиченості,

$$S = \left[\frac{1}{F_f} - \frac{1}{K_m} \right] c_p + \left[1 - \frac{2(1-2\nu)}{3(1+\nu)} \alpha \right] \frac{\alpha}{K}. \quad (27)$$

Для природних пластів часто характерна анізотропія, пов'язана або з природною шаруватістю (для осадових порід), або з розвитком систем паралельних мікротріщин, викликаних напругою в породі. Якщо пористе середовище не ізотропне, то в довільній ортогональній декартовій системі координат компоненти вектора градієнта тиску виражаються через компоненти вектора швидкості наступним чином:

$$\frac{\partial P}{\partial x_j} = -c_{im} v_m, \quad (28)$$

де c_{im} – тензор, залежний від в'язкості рідини η та геометричних характеристик пористого середовища.

Виражаючи компоненти вектора швидкості через компоненти вектора градієнта тиску, отримуємо

$$v_j = -\frac{k_{ij}}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (29)$$

де k_{ij} – тензор проникності, зворотний до тензору c_{ij} , залежить тільки від геометричних характеристик пористого середовища і має розмірність площі. Залежність (29) описує закон Дарсі для анізотропного пористого середовища. Тензор проникності k_{ij} є симетричним.

При значних швидкостях, коли вже не можна не враховувати інерційної складової опору руху рідини, передумови, закладені при виведенні закону Дарсі (29), перестають бути справедливими. До числа визначальних параметрів слід додати щільність ρ .

Зсувні деформації в'язкопружного пісковику можна описати за допомогою інтегрального оператора

$$\hat{\mu}_m = \mu_0 [1 - \xi \hat{R}(m, b)],$$

Або

$$\hat{R}(m, b) * e_0 = \tau^m \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n / \Gamma[m(1+n)] \right\} e_0, \quad x = (t / \tau)^m, \quad (31)$$

якщо $e_0 = const$. Пружні та в'язкі властивості породоутворюючих компонент представлені у таблиці 1, де E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона.

Таблиця 1. Пружні та в'язкі властивості породоутворюючих компонент

Порода	$E, ГПа$	ν	$\rho, 10^{-3} кг / м^3$	ξ	α	β
Аргіліт	6.2	0.24	2.66	0.00248	-0.71	0.025
Вапняк	15.76	0.159	2.69	0.0054	-0.70	0.054
Кварц	52.4	0.30	2.8	-	-	-
Вода	0.126	0.499	1.00	-	-	-

Як приклад для шаруватого теригенно-вапняковистого пісковику з прошарками темно-сірого вуглисто алевроліту розглянемо потенційну функцію ступеневого типу [5, 10]

$$\frac{1}{\mu} W(\mathbf{e}) = \left(1 + \frac{1}{2} \alpha_1\right) l_1^2 - 2l_2 + \beta (l_1^2 - 3l_2)^{\frac{n-1}{2}}$$

$$l_1 = tr \mathbf{e}; \quad 2l_2 = l_1^2 - tr \mathbf{e}^2;$$

$$e_{ij}^2 = e_{im} e_{mj}; \quad \alpha_1 = \lambda / \mu; \quad \beta = \gamma / (9\mu). \quad (32)$$

На рис. 2 зображений графік залежності функції повзучості при одновісому навантаженні для пористого пісковику із в'язкопружними властивостями компонентів (табл. 1). Можна зазначити, що у розглянутому інтервалі $0 < t / t_0 < 2.5$, де t_0 – характерний час ретардації пісковику, деформації повзучості збільшуються на 75%. На рис. 2, б зображено криву залежності спектру характерних часів ретардації. Як бачимо, ця крива має максимум, що свідчить про можливість виникнення небажаних ефектів резонансу у технічних об'єктах, що експлуатуються у взаємодії з в'язкопружним геологічним середовищем (фундаменти та ін).

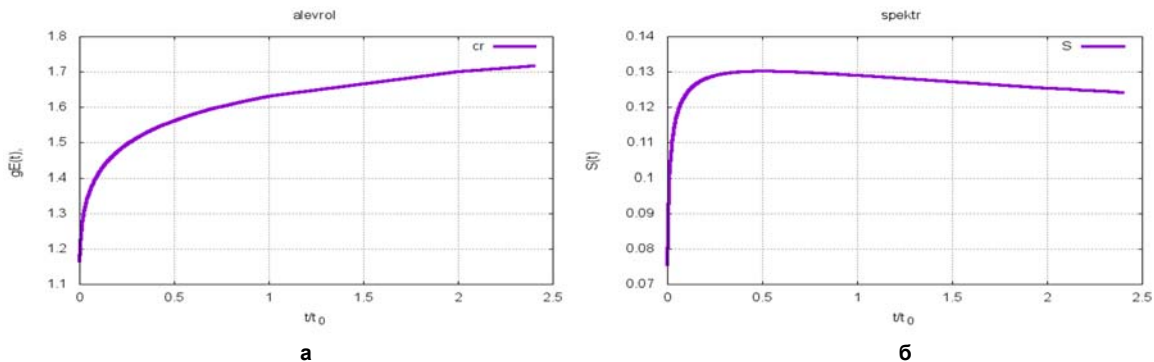


Рис.2. Залежність прогнозованої поздовжньої функції повзучості (а) та спектру функції повзучості (б) від часу для зразка вапняковистого пісковику

Висновки. За результатами проведеного дослідження визначено параметри трищинно-порової структури серії репрезентативних зразків теригенно-вапняковистих пісковику. Встановлено особливості нелінійної поведінки при зростанні зовнішнього тиску, звідки зроблено висновок про необхідність застосування нелінійної в'язкопружної моделі деформування. Наявність складної порової текстури пропонується моделювати використавши основні гіпотези поро-в'язко-пружності Біо [9, 10]. Найбільш перспективними напрямками подальших досліджень за даною тематикою, на наш погляд, є проведення дослідних робіт з урахуванням в'язкопружної анізотропії у пористому середовищі з попереднім гідростатичним навантаженням, що дозволить більш певно та надійно трактувати перспективність ущільнених порід-колекторів у цілому.

Список використаних джерел

1. Безродна І.М. Прогноз колекторських властивостей теригенних порід-колекторів за результатами акустичних досліджень в умовах змінного тиску (на прикладі Володимирської площі Волино-Поділля) / І. М. Безродна // Вісник Харківського національного університету. Серія "Геологія, географія, екологія". – 2014. – № 1128. – С. 21-25.
2. Безродна І. Оцінка структури пустотного простору низькопористих порід Зарічної площі за результатами петрофізичних та геофізичних досліджень / І. Безродна, А. Шинкаренко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2015. – № 69. – С. 53-58.

3. Выжва С.А. Эффективные упругие свойства нелинейных многокомпонентных геологических сред / С.А. Выжва, Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода // Геофизический журнал. – 2005. – 27, № 6. – С. 86-96.
4. Выжва С.А. Анализ фильтрационно-емкостных свойств карбонатных пород карбону Руденківсько-Пролетарського регіону за результатами петрофізичних досліджень / С.А. Выжва, І.М. Безродна, О.О. Козіонова // Геоінформатика. – 2012. – № 1. – С. 17-25.
5. Маслов Б.П. Новый метод математического моделирования процессов разрушения в литосфере / Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода, С.А. Выжва // Геоінформатика. – 2006. – № 3. – С. 53-61.
6. Маслов Б.П. Идентификация та оцінка достовірності визначальних параметрів електромагнітного поля у геологічних середовищах складної структури / Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода, М.В. Рева // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2008. – № 45. – С. 9-15.
7. Маслов Б. Прогнозування довготривалої міцності гірського масиву у геологічних середовищах складної структури / Б. Маслов, Я. Ляшенко, О. Максименко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2009. – № 3. – С. 57-60.
8. Berryman J.G. Models for computing geomechanical constants of double-porosity materials from the constituents' properties / J.G. Berryman, S.R. Pride // Journal of Geophysical Research. – 2002. – V. 107(B3). – P. ECV 2-1–ECV 2-14.
9. Berryman J.G. The elastic coefficients of double-porosity models for fluid transport in jointed rock / J.G. Berryman, H.F. Wang // Journal of Geophysical Research. – 1995. – V. 100(B12). – P. 24611–24627.
10. Biot M.A. Mechanics of incremental deformations / M.A. Biot // New York: John Wiley and Sons. – 1965. – 504 p.
11. Golub V.P. Identification of the Hereditary Kernels of Isotropic Linear Viscoelastic Materials in Combined Stress State II. Deviators Proportionality / V.P. Golub, B.P. Maslov, P.V. Fernati // International Applied Mechanics. – 2016. – 52, N.6. – P.111-125.

12. Maslov B.P. Thermal-stress concentration near inclusions in viscoelastic random composites / B.P. Maslov // Journal Engineering Mathematics. – 2008. – № 61. – P. 339-355.

13. Press W.H. Numerical Recipes in Fortran 90: The Art of Parallel Scientific Computing, Volume 2 of Fortran Numerical Recipes, Second Edition / W.H. Press et al. // – Press Syndicate of the University of Cambridge. – 2002. – 572 p.

14. Shapiro S.A. Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced micro-seismicity / S.A. Shapiro, E. Rothert, V. Rathz, J. Rindschwentner // Geophysics. – 2002. – V. 67, № 1. – P. 212–220.

15. Vyzhva S. Electrical properties of Cambrian rocks in Volyno-Podillia / S. Vyzhva, D. Onyshchuk, V. Onyshchuk, T. Pastushenko // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2014. – № 67. – С. 38-43.

References

1. Bezrodna, I.M. (2014). Prohnoz kolektorskykh vlastyvostei teryhennykh porid-kolektoriv za rezultatamy akustychnykh doslidzhen v umovakh zminnoho tysku (na prykladi Volodymyrskoi ploschki Volyno-Podillia). Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu. Seriya "Heolohiia, heohrafiia, ekolohiia", 1128, 21-25. [in Ukrainian].

2. Bezrodna, I., Shynkarenko, A. (2015). Otsinka struktury pustotnoho prostoru nyzkoporystykh porid Zarichnoi ploschki za rezultatamy petrofizychnykh ta heofizychnykh doslidzhen. Visnyk of Tars Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 69, 53-58. [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.69.08.53-58>.

3. Vyzhva, S.A., Maslov, B.P., Prodaivoda, G.T. (2005). Effektivnye uprugie svoystva nelineinykh mnogokomponentnykh geologicheskikh sred. Geofizicheskii zhurnal, 27(6), 86-96. [in Russian].

4. Vyzhva, S.A., Bezrodna, I.M., Kozionova, O.O. (2012). Analiz filtratsiino-iemnisnykh vlastyvostei karbonatnykh porid karbonu Rudenkivsko-Proletarskoho rehionu za rezultatamy petrofizychnykh doslidzhen. Heoinformatyka, 1, 17-25. [in Ukrainian].

5. Maslov, B.P., Prodaivoda, G.T., Vyzhva, S.A. (2006). Novyi metod matematicheskogo modelirovaniia protsessov razrusheniia v litosfere. Geoinformatyka, 3, 53-61. [in Russian].

6. Maslov, B.P., Prodaivoda, H.T., Reva, M.V. (2008). Identyfikatsiia ta otsinka dostovirnosti vyznachalnykh parametriv elektromahnitnoho polia u heolohichnykh seredovyschakh skladnoi struktury. Visnyk of Tars Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 45, 9-15. [in Ukrainian].

7. Maslov, B., Liashenko, Ia., Maksymenko, O. (2009). Prohnozuvannia dohotryvaloi mitsnosti hirsokho masyvu u heolohichnykh seredovyschakh skladnoi struktury. Visnyk of Tars Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3, 57-60. [in Ukrainian].

8. Berryman, J. G., Pride, S.R. (2002). Models for computing geomechanical constants of double-porosity materials from the constituents' properties. Journal of Geophysical Research, 107(B3), ECV 2-1–ECV 2-14. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JB000108>.

9. Berryman, J. G., Wang, H. F. (1995). The elastic coefficients of double-porosity models for fluid transport in jointed rock. Journal of Geophysical Research, 100 (B12), 24611–24627. <http://dx.doi.org/10.1029/95JB02161>.

10. Biot, M.A. (1965). Mechanics of incremental deformations. New York: John Wiley and Sons, 504 p.

11. Golub, V.P., Maslov, B.P., Fernati, P.V. et al. (2016). Identification of the Hereditary Kernels of Isotropic Linear Viscoelastic Materials in Combined Stress State II. Deviators Proportionality. International Applied Mechanics, 52(6), 111-125.

12. Maslov, B.P. (2008). Thermal-stress concentration near inclusions in viscoelastic random composites. Journal Engineering Mathematics, 61, 339-355. <http://dx.doi.org/10.1007/s10665-007-9204-0>.

13. Press, W.H. et al. (2002). Numerical Recipes in Fortran 90: The Art of Parallel Scientific Computing, Volume 2 of Fortran Numerical Recipes, Second Edition. Press Syndicate of the University of Cambridge, 572 p.

14. Shapiro, S.A., Rothert, E., Rathz, V., Rindschwentner, J. (2002). Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced micro-seismicity. Geophysics, 67(1), 212–220. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1451597>.

15. Vyzhva, S., Onyshchuk, D., Onyshchuk, V., Pastushenko, T. (2014). Electrical properties of Cambrian rocks in Volyno-Podillia. Visnyk of Tars Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 67, 38-43. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.67.07>.

Надійшло до редколегії 27.03.17

B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
E-mail: maslov@inmech.kiev.ua,
I. Onischuk, Cand. Sci. (Geol.), Senior Fellow
E-mail: oivan@univ.kiev.ua

A. Shynkarenko, PhD Student
E-mail: anastasiia.nesterenko@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

MODELLING OF NONLINEAR VISCOELASTIC PROPERTIES OF TERRIGENOUS-CALCAREOUS SANDSTONES

The studies of terrigenous-calcareous sandstones core were carried out in order to determine the structure of fractured and porous void space, petrophysical properties of samples and to conduct the further statistical analysis of the obtained data. The equipment of petrophysical laboratory of the Institute of Geology was used to carry out the experiments in the variable external pressure conditions in order to verify the hypothesis concerning substantially nonlinear properties of porous sandstone which depends on the amplitude and direction of the external pressure. Previous investigations related to the modeling of properties of the fluid-saturated porous sandstones and to the prediction of their physical and mechanical properties were analyzed.

A model of the nonlinear viscoelastic porous medium of the Bio type as the basic version for the further development was chosen. Presence of the viscous fluid substantially affects the reaction of medium for both gradual and periodic pressure changes. The previous papers of authors concerning the studied problem were used and the defining equations of the state with fractional-exponential functions of the creep and relaxation were applied.

The microstructural approach to the analysis of equivalent properties of the mass transfer in the isotropic viscoelastic medium was proposed in order to estimate the permeability parameters of the calcareous sandstones. The key moment was the application of integral Laplace-Carson transform during the studies of viscous effects, and Fourier transform during the analysis of complex, multilevel microstructure.

The analytical expressions to predict the viscoelastic functions of creep and relaxation were obtained and the algorithm of solution that includes numerical analysis as an important component in case of multicomponent medium with complex microstructure was presented.

Key words: void space structure, viscoelastic behaviour, creep, permeability.

Б. Маслов, д-р физ.-мат. наук, проф.
E-mail: maslov@inmech.kiev.ua,
И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотруд.
E-mail: oivan@univ.kiev.ua

А. Шинкаренко, асп.
E-mail: anastasiia.nesterenko@gmail.com
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
НИИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКО-УПРУГИХ СВОЙСТВ ТЕРРИГЕННО-ИЗВЕСТНЯКОВИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ

Проведены исследования ядра терригенно-известняковистых песчаников с целью определения структуры трещинно-порового пространства, петрофизических свойств и дальнейшей статистической обработки полученных данных. На оборудовании петрофизической лаборатории ИГиГ "Институт геологии" проведены эксперименты в условиях переменного внешнего давления для подтверждения гипотезы о существенно нелинейном поведении пористого песчаника, зависящего от амплитуды и знака внешнего давления. Проведен анализ литературных источников, посвященных моделированию поведения флюидонасыщенных пористых песчаников и прогнозированию их физико-механических свойств. В качестве базового для дальнейшего развития выбран вариант модели нелинейной вязко-упругой среды типа Био. Наличие вязкой жидкости существенно влияет на реакцию среды как при последовательном изменении давления, так и при периодических внешних влияниях. Используются предыдущие работы авторов по теме исследования, в том числе, применены определяющие уравнения состояния с дробно-экспоненциальными функциями ползучести и релаксации.

Для оценки параметров проницаемости образцов известняковых песчаников предложен микроструктурный подход к анализу эквивалентных характеристик массопереноса в изотропной пористой вязко-упругой среде. Ключевым моментом является применение интегральных превращений Лапласа-Карсона для исследования вязких эффектов, и Фурье – при анализе сложной, многоуровневой микроструктуры.

Получены аналитические выражения для прогноза вязко-упругих функций ползучести и релаксации, а так же изложен алгоритм решения, который включает численный анализ как важную составляющую в случаях многокомпонентной среды со сложной микроструктурой.

Ключевые слова: структура пустого пространства, вязко-упругое поведение, ползучесть, проницаемость.