

Петроупругое моделирование карбонатных пород-коллекторов с использованием модели двойной пористости

М.Ф. Гасеми

аспирант
Mfgh_110@mail.ru

И.О. Баюк

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник
ibayuk@yandex.ru

Институт физики Земли РАН
им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

В работе представлены параметрические петроупругие модели четырех различных карбонатных пород, содержащих поры и трещины в масштабе образца (модели двойной пористости). Для построения моделей использованы подходы теории эффективных сред, в частности, метод обобщенного сингулярного приближения, который учитывает связность пустотного пространства. Параметры петроупругих моделей определены в результате решения обратной задачи на основе анализа микроструктуры пород в различных масштабах, а также измерений скоростей упругих волн, проведенных по специальной методике, позволяющей разделить неоднородность и анизотропию упругих свойств пород. Использование результатов измерения проницаемости и трехосных испытаний образцов на прессе позволило сузить область неопределенности параметров моделей, получаемой в результате решения обратной задачи. Полученные петроупругие модели могут быть использованы для изучения поведения физических свойств пород в зависимости от изменения параметров, характеризующих их фильтрационно-емкостные свойства (трещинной и матричной пористости, формы пустот и степени их связности).

Определение физических свойств порово-трещиноватых углеводородосодержащих пластов является весьма сложной проблемой в разведочной нефтепромысловой геофизике. Хотя многочисленные работы были посвящены этому вопросу, неопределенность по-прежнему высока даже в предлагаемых современных методах. Методы определения средних в рассматриваемом масштабе физических свойств можно разделить на три основные группы: 1) эмпирические, 2) полуэмпирические, 3) теоретические, основанные на применении теории эффективных сред.

Методы теории эффективных сред позволяют учесть тип анизотропии включающихся компонентов среды и тип анизотропии включающей среды [1]. На основе этих методов можно определить одни физические свойства через другие, что играет большую роль в случае невозможности экспериментального измерения каких-либо свойств. Одним из наиболее приемлемых методов теории эффективных сред для моделирования физических свойств коллекторов углеводородов является метод обобщенного сингулярного приближения (далее — ОСП) [2, 3]. Его привлекательность обусловлена тем, что этот метод позволяет в неявном виде учитывать связность компонент и, в частности, пустотного пространства. Как и большинство методов теории эффективных сред, данный метод основан на классическом решении, полученном Эшелби для упругих полей напряжений и деформаций в системе, состоящей из произвольной анизотропной матрицы, содержащей

эллипсоидальное включение произвольной формы и ориентации. Включение имеет, в общем случае, анизотропные упругие свойства, но отличные от свойств матрицы [4].

Целью настоящей работы является построение петроупругой модели породы-коллектора в сантиметровом масштабе, т.е. в масштабе образцов, которые обычно испытывают в лабораторных условиях.

Определение петрофизических характеристик исследуемых образцов

Исследования образцов проводились в рамках единого экспериментально-теоретического комплекса петрофизических работ разработанного в ИФЗ РАН [5]. Для исследований были отобраны четыре полно-размерных куска керна карбонатных пород различного генезиса, которые характеризуются различными упругими свойствами. Для дальнейших исследований из кусков керна были выбурены 20 цилиндрических образцов диаметром 30 мм и максимальной длины до 75 мм (стандартные образцы). Для цилиндрических образцов определялись фильтрационно-емкостные свойства (далее — ФЕС) — пористость и проницаемость (по газу) с помощью стандартных методик (таб. 1). Литологическое изучение пород проводилось на оптическом лабораторном микроскопе Leica DM EP и микронзондовом комплексе на базе растрового (сканирующего) электронного микроскопа (РЭМ) «Jeol JSM-6480LV» с комбинированной системой рентгеноспектрального микроанализа (рис. 1). Для определения минерального

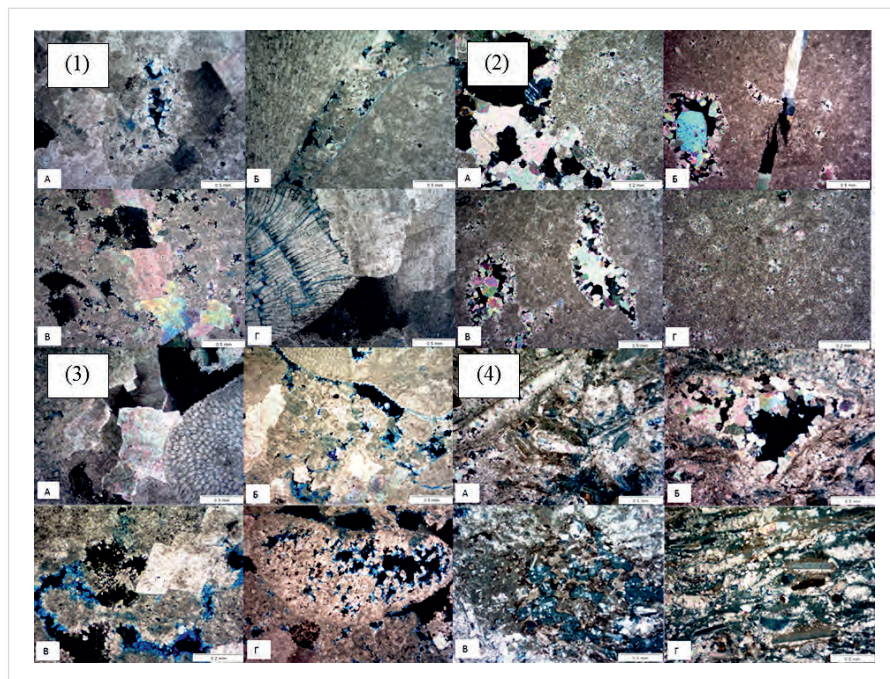


Рис. 1 — Фото оптического микроскопа образцов: (1) C1, (2) C2, (3) C3 и (4) C5. Масштаб в правом нижнем углу показывает величину от 0.2 до 0.5 мм

Fig. 1 — Photos of the optical microscope of samples: (1) C1, (2) C2, (3) C3 and (4) C5. The scale in the lower right corner shows a value from 0.2 to 0.5 mm

Материалы и методы

Метод обобщенного сингулярного приближения (ОСП), язык программирования Fortran 90, библиотека IMSL для Fortran 90.

Ключевые слова

карбонатные породы, математическое моделирование, метод ОСП обратная задача

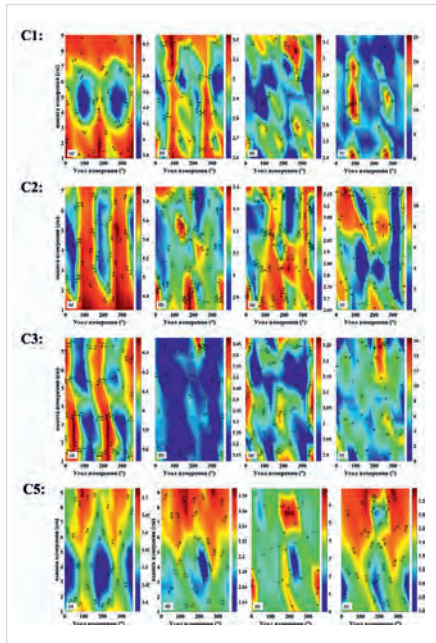


Рис. 2 — Результаты УЗТ образцов. (а) скорости продольных волн, (б) скорости быстрых поперечных волн, (в) скорости медленных поперечных волн, (г) степень неоднородности образца (коэффициент вариации)

Fig. 2 — Results of UST of samples. (a) velocities of compressional waves, (b) velocities of fast shear waves, (c) the velocities of slow shear waves, (d) the degree of sample inhomogeneity (coefficient of variation)

	Vp	σvp	Vs	σvs
C1-1	4.78	0.366	2.94	0.155
C1-2	5.09	0.321	2.97	0.134
C2-1	5.47	0.379	3.12	0.131
C2-2	6.04	0.078	3.18	0.042
C3-1	6.09	0.173	3.25	0.091
C3-2	6.27	0.069	3.26	0.059
C3-3	6.26	0.128	3.29	0.039
C5-1	3.54	0.078	2.22	0.033
C5-2	3.53	0.109	2.20	0.046
C5-3	3.33	0.080	2.08	0.049
C5-4	3.60	0.183	2.22	0.092

Таб. 3 — Измеренные скорости продольных и поперечных волн и их соответствующие среднее квадратическое отклонение (СКО)
Tab. 3 — Measured velocities of compressional and shear waves and their corresponding root mean square deviation (RMS)

Образец	Класс. Дунхама	Дпор(мм)	Дзерен (мм)	Умик (%)	φ (%)	k (мД)	k/φ
C1-1	разнозернистый биоспарит	0.125-2.0	1.25	1	7.64	1.303	0.1705
C1-2	разнозернистый биоспарит	0.125-0.4	0.3-1.25	1	6.099	0.431	0.0707
C2-1	ископаемый биомикрит	0.06-2.5	0.06-0.6	90	3.936	0.038	0.0097
C3-3	рыхлый биомикрит	0.06-0.4	0.0025-0.02	80	1.512	0.011	0.0073
C5-2	плотный биомикрит	0.06-0.5	0.06-0.125	70	11.542	0.037	0.0032
C5-3	плотный биомикрит	0.05-0.1	0.06-0.126	50	13.968	0.054	0.0039

Таб. 1 — Текстурные и микроморфологические характеристики исследуемых образцов, полученные на основе описаний изображений РЭМ

Tab. 1 — Textural and micromorphological characteristics of the studied samples, obtained based on SEM images

Образец	C1-1	C1-2	C2-1	C3-3	C4-2-1	C5-2	C5-3
Кальцит (%)	52	59.5	97.6	100	следы	82.4	52
Доломит (%)	47.5	40.1	1.3	0	33.6	14.5	34.6
Иллит (%)	0	0	0.5	0	4.8	0.7	4
Хлорит (%)	0	0	0	0	3.4	0	2.3
Кварц (%)	0.5	0.4	0.6	0	48.1	2.4	7.1
КПШ (%) (Ортоклаз, Санидин)	0	0	0	0	10	0	0

Таб. 2 — Минеральный состав исследуемых образцов.

Показаны объемные концентрации компонентов

Tab. 2 — Mineral composition of studied samples. Volumetric concentrations of the components are presented

состава изучаемых образцов применялся метод рентгенофазового анализа (таб. 2). Определение фильтрационно-емкостных свойств, минерального состава, изображения микроstructures, а также литологическое описание образцов выполнены группой Д. Короста (МГУ) в рамках работ петрофизического комплекса ИФЗ РАН [5].

Ультразвуковая томография

С целью изучения неоднородности внутреннего строения образцов полноразмерного ядра проведена ультразвуковая томография (далее — УЗТ) образцов в соответствии с методикой, предложенной в патенте RU 2515332 В.А. Петрова и Р.М. Насимова «Способ определения неоднородностей упругих и фильтрационных свойств горных пород».

УЗТ позволяет определить степень неоднородности и тип анизотропии породы в масштабе образца. Тип анизотропии определяется путем сравнения характера поведения скоростей упругих волн с таковыми в кристаллах с известным типом анизотропии. Степень неоднородности вычислялась как коэффициент вариации скорости для данного направления и рассчитывалась по результатам измерений на разных высотах, но для одного азимута («угла измерения»). Результаты УЗТ представлены на рис. 2 и в таб. 3. Из анализа рисунков следует, что данные образцы являются неоднородными по скоростям упругих волн. Анализ поведения скоростей поперечных волн не позволяет отнести эти породы

ни к одному из известных типов анизотропии. Следовательно, в масштабе образца породы являются неоднородными и изотропными.

Построение математической модели упругих свойств

Основные уравнения

На основе анализа микроstructures породы в разных масштабах построены параметрические математические модели для исследуемых образцов. Основой такого моделирования является теория эффективных сред, которая позволяет в виде аналитических формул связать физические свойства породы, измеряемые в эксперименте, с параметрами ее состава и микроstructures, входящими в модель.

В качестве параметров микроstructures могут быть выбраны таковые, характеризующие форму пустот (пор и трещин) и других включений, степень их связности, характеристики, описывающие ориентацию трещин, пор и других включений, трещинная пористость [6]. Для построения моделей пород, представленных образцами ядра C1, C2, C3, C5, была использована модель двойной пористости («Модель I»). Предполагалось, что пустотное пространство представлено пустотами двух видов — порами и трещинами. Пустоты моделировались эллипсоидами вращения, форма которых характеризуется всего одним параметром — аспектным отношением, которое является аналогом относительного раскрытия пор и трещин. Считалось,

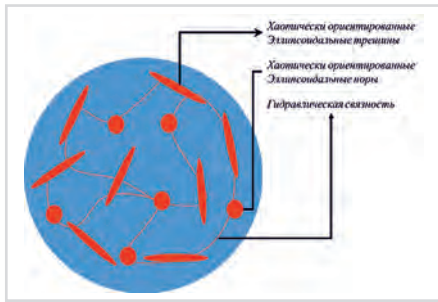


Рис. 3 — Схема модели двойной пористости для образцов карбонатных пород
Fig. 3 — Diagram of the double porosity model, suggested for carbonate samples

что поры и трещины имеют хаотическую ориентацию. Это приводит к изотропии упругих свойств породы. Степень связности пор и трещин описывается специальным параметром, который, в общем случае, может изменяться от 0 до 1. Модули упругости матрицы полагаются неизвестными параметрами модели. Однако на значения этих модулей налагались ограничения, определенные по минеральному составу пород. Схема модели двойной пористости представлена на рис. 3.

Связь между эффективными упругими свойствами пород и параметрами модели определялась посредством формул метода ОСП [1], [6], [2]. Формула этого метода для эффективного тензора упругости произвольного типа анизотропии C^* имеет вид (в тензорной форме):

$$C^* = \langle C : [I - \Gamma^* : (C - C^c)]^{-1} \rangle : \langle [I - \Gamma^* : (C - C^c)]^{-1} \rangle^{-1} \quad (1)$$

В этом выражении треугольные скобки предполагают операцию усреднения по всем компонентам породы, которые имеют отличающиеся друг от друга модули упругости, параметры формы и ориентации.

В формуле (1) C — тензор упругости каждой компоненты; I — единичный тензор 4-го ранга; C^c — тензор упругости так называемого «тела сравнения». Согласно теории, «тело сравнения» является тензором упругости некоторой однородной среды, и выбор этой среды может быть произволен. Вследствие этого «тело сравнения» может быть выбрано в таком виде, чтобы были учтены основные

особенности распределения полей напряжений и деформаций или взаимного расположения неоднородностей в породе.

Ниже даны пояснения к членам, входящим в уравнение (1), в индексной форме (все индексы принимают значения от 1 до 3)

$$\begin{aligned} \delta C_{ijkl} &\equiv C_{ijkl} - C_{ijkl}^c, \\ \Gamma_{lmnk}^* &= \frac{1}{4} (\tilde{a}_{klmn} + \tilde{a}_{mlnk} + \tilde{a}_{nlmk} + \tilde{a}_{mnlk}), \\ \tilde{a}_{klmn} &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi n_{mn} \Lambda_{kl}^{-1} \sin \theta d\theta d\varphi, \\ \Lambda_{kl} &\equiv C_{klmn}^c n_m n_n \equiv n_m n_n, \\ n_1 &= \frac{1}{a_1} \sin \theta \cos \varphi, n_2 = \frac{1}{a_2} \sin \theta \sin \varphi, n_3 = \frac{1}{a_3} \cos \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3 — полуоси эллипсоидов, моделирующих форму включений (минеральных зерен, органического вещества, пор, трещин).

Параметрами модели с двойной пористостью являлись: аспектное отношение пор и трещин, параметр связности пустот, трещинная пористость. Матрицей считалась та часть породы, которая не фильтрует флюид — зерна минералов, частицы органического вещества, связанная вода.

В данной работе тензор упругости тела сравнения был выбран в виде $C^c = (1-f)C^* + fC^c$, где C^* и C^c — тензоры упругости матрицы и флюида, а f — эмпирический параметр, характеризующий степень связности фильтрующих пустот (параметр связности). Такое тело сравнения дает возможность определять эффективные свойства сред, имеющих различные типы микроструктуры. Меняя параметр связности от 0 до 1, можно рассматривать среды различного строения — от сред типа «изолированные включения в минеральной матрице» (верхняя граница Хашина-Штрикмана) до некоторого экзотического случая представления среды в виде эллипсоидальных частиц минерального вещества, окруженных флюидом (нижняя граница Хашина-Штрикмана) [1].

Как правило, количество неизвестных параметров модели превышает число измеренных физических величин, используемых для решения задачи по определению параметров модели по результатам измерений (обратная задача). Поскольку увеличение количества неизвестных параметров модели приводит к увеличению степени неопределенности в

полученных результатах, необходимо анализировать чувствительность построенной модели эффективных физических свойств к ее параметрам.

Решение обратной задачи по определению параметров модели

В настоящей работе для исследуемых образцов были измерены скорости продольных и поперечных волн (V_p и V_s). Согласно предложенной модели для исследованных пород, число неизвестных параметров составляет четыре. Следовательно, задача является недоопределенной и имеет бесконечно много решений. В этом случае большое значение приобретает исследование возможности сужения границ искомого параметров. Параметры модели можно ограничить на основе геологических и геофизических данных. Для имеющихся образцов в этой работе образцов мы рассчитали ограничения на параметр связности (f) на основе измеренных ФЕС. Был введен параметр, являющийся отношением проницаемости образца к его пористости (параметр d). Область изменения этого параметра была условно разделена на три интервала. Для каждого интервала изменения этого параметра были выбраны соответствующие интервалы поиска параметра f . При выборе интервалов изменения параметров предполагалось, что большим значениям параметра d соответствуют и большие значения параметра связности.

Трещинная пористость и аспектное отношение трещин ограничивались на основе анализа результатов трехосных испытаний образцов. При этом использовались результаты работ Берга и Уолла [7],[8], согласно которым при всесторонней нагрузке начальный нелинейный участок «напряжение — деформация» связан с закрытием микротрещин определенного аспектного отношения.

Обсуждение результатов

Результаты ультразвуковой томографии, полученные для представленных образцов, показывают, что внутренняя структура этих образцов различна. Фотографии микроструктуры образцов в разных масштабах подтверждают наш вывод о микроструктурном несходстве представленных образцов. Хотя структурные характеристики этих образцов различны, все они имеют одно основное общее свойство: изотропность и неоднородность. Не существует однородности в значениях измеренных упругих скоростей по вертикальной оси образцов, что иллюстрирует их неоднородность. Более того, радиальные изменения скоростей упругих волн не проявляют регулярности, характерной для какого-либо конкретного типа анизотропии.

В предлагаемой петроупругой модели двойной пористости эффект размера кристаллов и пор/трещин не может быть учтен в явном виде, поскольку методы теории эффективных сред, применимые в случае, когда длина волны много больше размера включений, сам размер включений не учитывают. Как было предложено в работе [9], влияние размера включений может быть неявно учтено путем разномасштабного моделирования по принципу «от меньших неоднородностей — к большему».

Другое предположение, сделанное в модели двойной пористости — это сферичность кристаллов (микро и макро). С точки зрения

Образец	f	σ_f	$\phi_{\text{трещин}}(\%)$	σ_ϕ	$a_{\text{пор}}$	σ_p	$a_{\text{трещин}}(10^{-4})$	$\sigma_c(10^{-4})$
C1-1	0.53	0.025	0.007	0.002	0.74	0.239	0.87	0.480
C1-2	0.59	0.016	0.002	0.002	0.28	0.138	0.49	0.437
C2-1	0.49	0.050	0.008	0.002	0.45	0.112	2.87	0.187
C2-2	0.44	0.051	0.002	0.001	0.39	0.179	2.71	0.206
C3-1	0.55	0.045	0.002	0.002	0.43	0.183	2.38	0.251
C3-2	0.32	0.029	0.001	0.001	0.88	0.167	2.74	0.378
C3-3	0.46	0.016	0.001	0.001	0.45	0.201	2.18	0.338
C5-2	0.42	0.020	0.129	0.029	0.87	0.160	4.10	0.875
C5-3	0.42	0.016	0.111	0.017	0.86	0.121	2.70	0.383
C5-4	0.49	0.010	0.020	0.024	0.17	0.125	0.80	0.822

Таб. 4 — Параметры, характеризующие поровое пространство исследуемых образцов, полученные в результате решения обратной задачи
Tab. 4 — Parameters characterizing the pore space of studied samples, obtained through solving the inverse problem

Примечание. Параметр a означает аспектное отношение пор и трещин; σ — среднеквадратическое отклонение параметра; индексы "p" и "c" относятся к порам и трещинам соответственно.

теории, допустимо рассматривать зерна как эллипсоиды с неизвестным аспектным отношением вместо зерен сферической формы. Однако это приводит к увеличению числа неизвестных параметров модели и, следовательно, к увеличению неопределенности решений обратной задачи.

На рис. 4 показаны значения параметров модели для одного из образцов-близнецов в процессе работы алгоритма нелинейной оптимизации, направленной на поиск минимума функционала, который является усредненной невязкой расчетных и теоретических значений скоростей. «Зеленые зоны» иллюстрируют подобранные параметры, при которых расхождение теоретических и экспериментальных значений скоростей находится в приемлемом диапазоне, определяемом степенью неоднородности породы. Все решения для параметров модели, полученные в «зеленых зонах», запоминались, а по окончании работы алгоритма статистически обрабатывались. Результаты определения параметров моделей показаны в таб. 4.

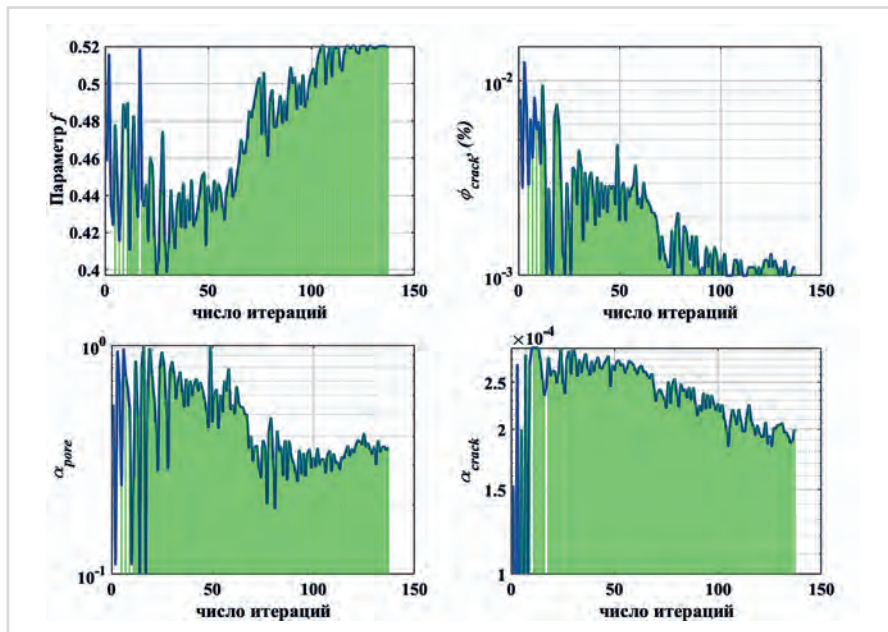


Рис. 4 — Итерации алгоритма оптимизации. Зеленый цвет показывает зоны с приемлемыми значениями функционала невязки скоростей в соответствии с оценкой степени неоднородности породы

Fig. 4 — Iterations of the optimization algorithm. Green color indicates zones with acceptable values of the velocity residual in accordance with the estimation of the degree of heterogeneity of the rock

Итоги

Построены параметрические математические модели изотропных упругих свойств четырех карбонатных пород. Модели отражают наличие в породах пустот двух типов — пор и трещин. Найденные численные значения параметров моделей характеризуют форму пор и трещин, трещинную пористость, а также степень связности пустот.

Выводы

На основе лабораторных исследований ядра построены параметрические петроупругие модели четырех карбонатных пород (известняков), имеющих различное внутреннее строение и различные фильтрационно-емкостные свойства. Петроупругие модели являются моделями двойной пористости, предполагающими наличие в породах двух типов связанных между собой пустот — пор и трещин, которые имеют хаотическую ориентацию в объеме породы. Сравнение полученных параметров микроструктуры пород с ее изображениями показывает их удовлетворительное соответствие. Это, в свою очередь, свидетельствует о применимости предложенной модели двойной пористости и метода поиска параметров модели (нелинейной оптимизации с ограничениями на параметры). Найденные параметры микроструктуры пород можно использовать как для анализа влияния параметров модели

на упругие свойства этих пород, так и для теоретической оценки других физических свойств, таких как коэффициент теплопроводности, электропроводности и т.д., что позволяет реализовать теория эффективных сред.

Список литературы

1. Баяк И.О. Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов. Москва: ИФЗ РАН, 2013. 228 с.
2. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. Москва: Наука. 1977. 400 с.
3. Bayuk I.O., Chesnokov E.M. Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, v. 23, issue 3, pp. 361–366.
4. Eshelby J.D., The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1957. v. 241, issue 1226, pp. 376–396.
5. Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гилязетдинова Д.Р., Краснова М.А., Корост Д.В. и др. Сейсмоакустические исследования ядра при пластовых условиях // Технологии сейсморазведки. 2015. №2. С. 36–45.
6. Баяк И.О. Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов // Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО. 2011. №12. С. 107–120.
7. Walsh J.B. The effect of cracks on the compressibility of rock. *Journal of Geophysical Research*, 1965, v. 70, issue 2, pp. 381–389.
8. Berg C.A. Deformation of fine cracks under high pressure and shear. *Journal of Geophysical Research*, 1965. v. 70, issue 14, pp. 3447–3452.
9. Bayuk I.O., Ammerman M., Chesnokov E.M. Upscaling of elastic properties of anisotropic sedimentary rocks. *Geophysical Journal International*, 2008, v. 172, issue 2, pp. 842–860.

ENGLISH

GEOPHYSICS

Petroelastic modeling of carbonate rocks using a dual porosity model

UDC 550.3

Authors:

Mohammad F. Ghasemi — Ph.D. student; Mfgh_110@mail.ru
Irina O. Bayuk — Sc.D., chief researcher; ibayuk@yandex.ru

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this work, parametric petroelastic models for four different carbonate rocks containing pores and cracks in the sample scale (double porosity models) are presented. To construct models are applied approaches of the Effective Medium Theory, in particular, the

generalized singular approximation method are used. This method takes into account the hydraulic connectivity of the void space. The parameters of the petroelastic models can be estimated through solution of the inverse problem using measured acoustic waves velocities. Analysis of SEM images

and primary petrophysical properties along with triaxial test data were used to narrow the search domain of the applied optimization algorithm. The obtained petroelastic models can be used to study the behavior of the physical properties of rocks as a function of their

structural characteristics (such as, fracture and matrix porosity, the shape of voids and the degree of their connectivity).

Materials and methods

General singular approximation method, fortran programming language, IMSL Fortran library.

Keywords

carbonate rocks, mathematical modeling, GSA method, inverse problem

Results

Parametric mathematical models of isotropic elastic properties of four carbonate rocks

have been constructed. The models reflect the presence of two types of voids in pore space — pores and cracks. Estimated numerical values for the parameters of the models characterize the shape of the pores and cracks, the fracture porosity, and the degree of connectivity of the voids.

Conclusions

A dual porosity petroelastic model was suggested for four carbonate rocks, with different internal structure and petrophysical properties, based on the laboratory investigation. The implemented double porosity model suggests the presence of two types of interconnected voids — pores and

cracks with spatially chaotic orientation in studied rocks volume. A comparison of the obtained parameters of the microstructure of the rocks with its SEM images manifests satisfactory agreement. This, in turn, indicates the applicability of the proposed model of double porosity and the method of searching for model parameters (nonlinear optimization with constraints on parameters). Further, the estimated structural parameters in various scales, can be used to analyze the influence of these parameters on the elastic properties of these rocks, and for the theoretical evaluation of other physical properties, such as the coefficient of thermal conductivity, electrical conductivity, etc...

References

1. Bayuk I.O. *Mezhdistiplinarnyy podkhod k prognozirovaniyu makroskopicheskikh i fil'tratsionno-embkostnykh svoystv kollektorov uglevodorodov* [Interdisciplinary approach to prediction of macroscopic properties, porosity and permeability of hydrocarbon reservoir rocks]. Moscow: IPE RAS, 2013, 228 p.
2. Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [The theory of elasticity of microinhomogeneous media]. Moscow: Nauka, 1977, 400 p.
3. Bayuk I.O., Chesnokov E.M. Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, v. 23, issue 3, pp. 361–366.
4. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1957. v. 241, issue 1226, pp. 376–396.
5. Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Gilyazetdinova D.R., Krasnova M.A., Korost D.V. and oth. *Seismoakusticheskie issledovaniya kerna pri plastovykh usloviyakh* [Seismoacoustic studies of core under reservoir conditions]. *Seismic Survey Technologies*, 2015, issue 2, pp. 36–45.
6. Bayuk I.O. *Teoreticheskie osnovy opredeleniya effektivnykh fizicheskikh svoystv kollektorov uglevodorodov* [Theoretical background for determination of effective physical properties of reservoir rocks]. *Acoustics of Heterogeneous Media. Yearbook of Russian Acoustical Society*, 2011, issue 12, pp. 107–120.
7. Walsh J.B. The effect of cracks on the compressibility of rock. *Journal of Geophysical Research*, 1965, v. 70, issue 2, pp. 381–389.
8. Berg C.A. Deformation of fine cracks under high pressure and shear. *Journal of Geophysical Research*, 1965. v. 70, issue 14, pp. 3447–3452.
9. Bayuk I.O., Ammerman M., Chesnokov E.M. Upscaling of elastic properties of anisotropic sedimentary rocks. *Geophysical Journal International*, 2008, v. 172, issue 2, pp. 842–860.



производственное объединение
«ЭЛЕКТРОТОЧПРИБОР»

Вам нужны взрывобезопасные светильники?
Вам нужны светильники разной мощности и крепления?
Вам нужна особая диаграмма светораспределения?
Вам нужна помощь в оптимизации размещения светильников по заданной освещенности?

Обращайтесь к нам!

- ◆ Более 50 лет опыта разработки и производства взрывобезопасных изделий.
- ◆ Отличная стабильность светового потока за время эксплуатации.
- ◆ Диапазон мощностей от 15 до 150 Вт.
- ◆ Диапазон температур от минус 60 до + 50 С.
- ◆ Сертификаты ТР ТС для I и II групп.
- ◆ Протоколы по светотехнике и ЭМС.

ЗАО ПО "Электроточприбор"
Россия, 644042, г.Омск, пр. К.Маркса, 18/13
Тел./ факс +7(3812) 39-69-11, 39-62-32
e-mail: sales@etpribor.ru
www.etpribor.ru