

Петроупругое моделирование карбонатных пород: обзор некоторых методов теории эффективных сред и аспектов их применимости

DOI 10.24411/2076-6785-2019-10015

И.А. Березина

аспирантка, инженер

irene.berezina@gmail.com

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

В статье представлен обзор методов теории эффективных сред в контексте петроупругого моделирования (Rock Physics), с указанием ограничений применимости. Произведена оценка эффективных упругих свойств моделируемого пространства несколькими методами эффективной среды, в которой матрица состоит из кальцита, а пустотное пространство рассматривается как модель двойной пористости. Для трех типов карбонатных пород на масштабе зерна построены параметрические упругие модели на основе метода обобщенного сингулярного приближения, используя данные анализа микроструктуры пород в различных масштабах, а также измерений скоростей упругих волн на стандартных образцах. В результате решения обратной задачи были определены параметры петроупругих моделей.

Материалы и методы

Метод теории эффективных сред, язык программирования Fortran 90, библиотека IMSL для Fortran 90.

Ключевые слова

карбонатные породы, методы rock physics, петроупругое моделирование

Введение

Петроупругое моделирование (методы Rock Physics) является эффективным инструментом для учета влияния внутреннего строения горных пород, анизотропии и насыщения на физические свойства горных пород. Rock Physics связывает упругие свойства, полученные из геофизических данных, с коллекторскими свойствами пород. Группу методов Rock Physics используют на различных этапах разведки и разработки нефтяных месторождений в комплексе с сейсмической инверсией, 4D сейсморазведкой, моделированием коллекторов, гидродинамическим моделированием, геомеханикой и геотермальными исследованиями.

Однако многообразие методов физики горных пород затрудняет выбор оптимального метода. В каком случае является обоснованным выбрать «сложную» модель, требующую знания многих априорных сведений, а в каком можно выбрать «простую» модель, которая даст сопоставимые результаты? Одним из ключевых вопросов, которым посвящено данное исследование, является разброс оценок эффективных упругих свойств различными методами для одной и той же породы.

Проблема выбора метода петроупругого моделирования еще более актуальна для карбонатных пород, поскольку они менее изучены по сравнению с терригенными породами. Карбонатные породы формируются в различных геологических обстановках и сильно подвержены влиянию вторичных процессов преобразования, поэтому они очень разнообразны по макро- и микроструктуре, неоднородны и имеют большой разброс физических свойств.

В данной работе была сделана попытка ответить на поставленные выше вопросы. Рассматривались аппроксимационные методы теории эффективных сред. Проведен анализ математических методов физики горных пород: метод Кастера-Токсоза [1], самосогласованный метод эффективной среды [2], метод дифференциальной эффективной среды [3], метод Мори-Танака [4], метод обобщенного сингулярного приближения [5, 6]. Петроупругие модели для расчета эффективных упругих свойств строились в масштабе образцов зерна, в сантиметровом масштабе (модели первого уровня) для четырех типов карбонатных пород.

Метод

Описание исследуемых образцов

В качестве материала исследования были взяты семь полноразмерных кусков зерна карбонатных пород, имеющих разную степень неоднородности и микроструктуру.

Экспериментальный комплекс разномасштабных исследований зерна подробно описан в работе [7] и включал в себя: 1а) сканирование полноразмерного зерна с помощью метода компьютерной томографии (СТ-сканирование); 1б) ультразвуковая томография (УЗ) зерна [8]; 2) изготовление образцов стандартного размера (цилиндров диаметром 30 мм и высотой 60 мм); 3а) СТ-сканирование образцов стандартного размера; 3б) УЗ образцов стандартного размера, включая измерения скоростей в направлениях под углом к оси зерна; 4) определение плотности, минерального состава и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС).

По результатам ультразвуковой томографии и анализу скоростей упругих волн совместно с анализом данных СТ-сканирования был сделан вывод, что представленные образцы карбонатных пород являются неоднородными и изотропными [8].

Описание литологии и микроструктуры проводилось по данным, полученным на оптическом лабораторном микроскопе Leica DM EP и микронзондовом комплексе на базе растрового электронного микроскопа (РЭМ) «Jeol JSM-6480LV» с комбинированной системой рентгеноспектрального микроанализа [8].

На основе детального анализа шлифов и литологического описания образцы были объединены в 3 группы согласно структурно-генетической классификации известняков по В.П. Морозову [9]: 1) биокластовые (2 подгруппы: биокластово-фитогенный со спаритовым цементом и биокластово-зоогенный с микроитовым цементом); 2) микритовые, пелитоморфные; 3) оолитовые.

Минеральный состав группы 1 состоит из кальцита и доломита (от 14,5 до 47,5%) и небольшим содержанием кварца (до 7%). Минеральный состав групп 2 и 3 полностью кальцитовый.

Образцы группы 1 характеризуются средними значениями открытой пористости (в пределах 6–14%) и проницаемости (до 2,12 мД). Образцы группы 2 характеризуются низкими значениями пористости (< 4%) и

Группа	V _{кальцит} , %	V _{доломит} , %	V _{кварц} , %	V _p , км/с	V _s , км/с	фоткр, %	k, мД
1а	67,20	24,55	4,75	3,50	2,18	12,71	2,12
1б	55,75	43,80	0,45	4,94	2,96	6,87	
2	100,00	0,00	0,00	6,03	3,22	2,67	0,03
3	99,50	0,00	0,50	3,77	2,22	22,44	10,00

Таб. 1 — Скорости упругих волн, пористость и проницаемость пород
Tab. 1 — Velocity, porosity and permeability of studied rocks

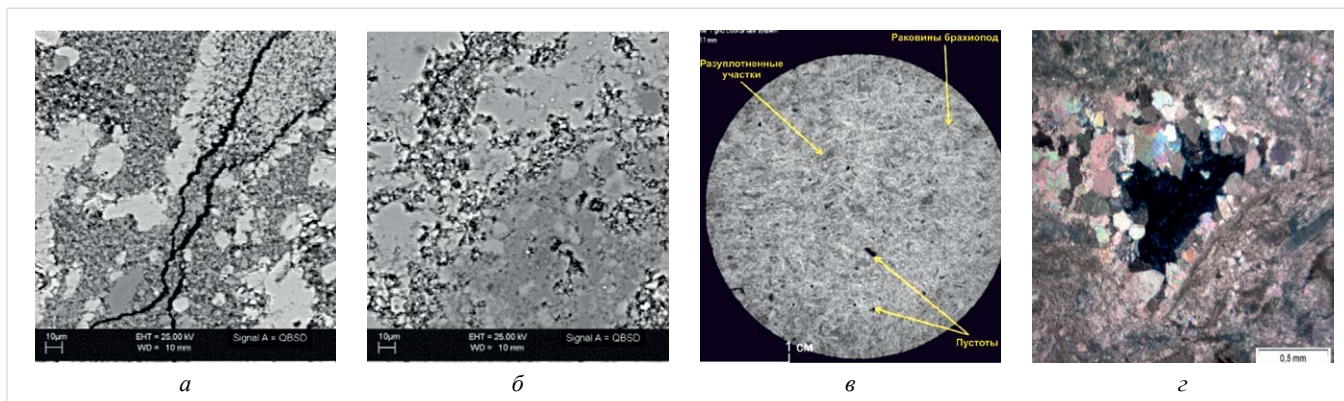


Рис. 1 — Типы пустотного пространства в образце карбонатных пород группы 1: а) трещины; б) и д) поры; в) микропористость
 Fig. 1 — Pore network types of carbonate rocks (group 1): а) cracks, б) and д) pores; в) microporosity

проницаемости (0,031 мД). Более высокими фильтрационно-емкостными характеристиками характеризуются образцы группы 3: открытая пористость образцов достигает 23%, а абсолютная газопроницаемость — 10 мД.

По данным о микроструктуре были выделены следующие типы пористости: а) микропористость: межкристаллическая пористость, межзерновая; б) макропористость: каверны — обычно каверны растворения и выщелачивания, поры между оолитами — в оолитовом известняке, пустоты между водорослевыми комками — межформенные; внутриформенные поры растворения, трещины.

Разрешение оптического микроскопа позволяет идентифицировать только макро- и мезопористость и оценить ее количество, но присутствие микропор видно на снимках РЭМ (рис. 1). Открытая пористость, определяемая по газу, дает хорошую оценку общей связанной пористости. Таким образом, можно оценить количество связанной микропористости как разницу между наблюдаемой макро-мезопористостью в шлифах и измеренной пористости по газу на образцах керна.

Также можно провести грубую оценку закрытой пористости. Общая пористость рассчитывается, зная измеренную плотность образца и плотность минерального скелета (например, на основе данных рентгенофазового анализа о минеральном составе). Тогда закрытая пористость равна разнице между общей пористостью и открытой пористостью, определенной по газу. Для исследуемых пород содержание закрытой пористости составляет около 1%, за исключением пород группы 2, для них — до 2%.

Методы rock physics

В петроупругом моделировании горная порода рассматривается как материал, состоящий из компонентов (минеральные зерна, поры, трещины, органическое вещество и т.п.) и обладающий микроструктурой, которая должна отражать особенности внутреннего строения горной породы. Параметрами микроструктуры могут быть объемное

содержание включений, форма пустот (пор и трещин) и других включений, степень их связности, характеристики ориентации включений, емкость трещин и др. [10]. Большая часть методов физики горных пород основана на решении Эшелби [11] и использует аппроксимацию включений в виде эллипсоидов с характерным аспектным отношением a . Эллипсоидальная форма включений может имитировать различные геометрии пустот, например: 1) каверны моделируются в виде эллипсоидов с большим аспектным отношением; 2) иглоподобные пустоты моделируются с $a \gg 1$; 3) трещины — с очень низким аспектным отношением $a \ll 1$; 4) поры — с аспектным отношением в диапазоне от 0,1 до 1, соответствующего сфере.

В качестве уравнений связи эффективных свойств с параметрами микроструктуры используют формулы методов теории эффективных сред. Наиболее распространенными методами для оценки эффективных упругих свойств карбонатных пород являются самосогласованный метод эффективной среды, метод дифференциальной эффективной среды [12, 13, 14]; метод Мори-Танака [15], метод Т-матрицы [16, 17], метод обобщенного сингулярного приближения [18, 19].

Рассмотрим подробнее некоторые методы теории эффективной среды. Предполагается, что среда линейно-упругая, статистически однородная и выполняется условие эргодичности.

1. Метод Кастера-Токсоза (КТ)

Используя длинноволновую теорию рассеяния первого порядка, Кастер и Токсоз [1] вывели выражения для оценки эффективных упругих модулей неоднородного материала в изотропном случае, состоящего из матрицы, представленной сферами, и включений, имеющих различную геометрию. Предположение о невязности между включениями нарушается, когда отношение концентрации одного типа включений к его аспектному отношению $\frac{v}{\alpha}$ больше 1, поскольку включения

затем перекрываются, по крайней мере частично. Бэрриман показал [20], что результаты, полученные методом КТ, лежат вне границ Хашина-Шрикмана, когда включения представлены дисками при любой их концентрации или иглами при концентрации не больше 60%.

$$\frac{K^* - K_m}{3K^* + 4\mu_m} = \frac{K_i - K_m}{3K_m + 4\mu_m} \sum_{n=1}^N v_i \frac{1}{3} T_{ijj}(\alpha_i),$$

где T_{ijj} — функции, зависящие от формы, т.е. от аспектного отношения.

2. Самосогласованный метод (Сс)

Идея метода самосогласования заключается в аппроксимации упругого поля неоднородного материала, состоящего из множества включений, помещенных в бесконечную изотропную среду, которая обладает такими же упругими свойствами, что и композит в целом. Самосогласованный метод подходит для сред, где нет четко выраженной матрицы.

Для расчета упругих характеристик в поликристаллах и композитах для сферических и эллипсоидальных включений этот метод был применен Херши (1954), Хиллом (1965), Муром (1966), Шермергором (1970) и др. В работах Будянского и О'Конелла (1974, 1976) рассматривался случай сухих и насыщенных трещин. Приняв самосогласованное приближение, Бэрриман [2] реализовал вариант решения Кастера-Токсоза, предназначенный для минимизации многократного рассеяния в контексте относительно простой вычислительной схемы. Предполагается, что композит является изотропным со случайно ориентированными эллипсоидальными включениями:

$$\sum_{i=1}^N v_i (K_i - K^*) \frac{1}{3} T_{ijj} = 0$$

$$\sum_{i=1}^N v_i (\mu_i - \mu^*) \frac{1}{5} (T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj}) = 0$$

В анизотропном случае метод приводит к системе уравнений, число которых равно числу констант для эквивалентной упругой среды [5]. Однако, как было отмечено, например, в работе [21], данный метод переоценивает влияния включений. В случае концентраций пор больших 0,5 метод приводит к отрицательным значениям модулей упругости: результат лежит вне вилки Хашина-Штрикмана. В случае высокой концентрации трещин, модули Юнга, объема и сдвига становятся отрицательными, а коэффициент Пуассона превышает 0,5 для насыщенных трещин.

Группа	$\phi_{\text{откр}}, \%$	$\phi_{\text{Микро-Т}}, \%$	$\phi_{\text{шлиф}}, \%$	$\phi_{\text{микро}}, \%$	$\phi_3, \%$
1а	12,71	0,06	1,00	11,71	0,5
1б	6,87	<5	4,00	2,87	
2	2,67	1,50	2,00	0,67	1,95
3	22,44	10,00	15,00	7,44	0,92

Таб. 2 — Параметры пустотного пространства пород
 Tab. 2 — Pore network parameters

Методы	Матрица	Концентрация включений	Учет взаимодействия включений	Анизотропия	Геометрическая связанность пустот	Количество компонентов
Метод К-Т (Kuster, Toksoz, 1974)	+	$\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{\alpha_i} < 1$	-	-	-	-
Сс метод (Berryman, 1980)	-	<50%	+	+	-	мульти
Метод ДЭС (Norris, 1985)	+	любая	-	+	-	2
Метод М-Т (Benveniste, 1987)	+	<30%	+	+	-	2
Метод ОСП (Baýuk, Chesnokov, 1998)	+	любая	+	+	+	мульти

Таб. 3 — Сводная таблица методов rock physics
Tab. 3 — Rock physics methods

3. Метод Мори-Танака (М-Т)

Метод Мори-Танака относится к методам теории эффективного поля. Обычно используют вариант метода Мори-Танака, переформулированный Бенвенисте [4] для двухкомпонентной среды, состоящей из матрицы и включений ориентированных или хаотично расположенных. Предполагается, что каждая неоднородность вложена в бесконечную матрицу. Взаимодействие между отдельными включениями учитывается путем приложения

Эффективные модули	К-Т	Сс	ДЭС	М-Т
I Кальцит + поры = с1				
К	58,24	51,18	56,79	58,24
μ	26,42	24,28	25,38	26,42
с1 + трещины монетообразные				
к	57,12	45,62	54,85	57,13
μ	22,26	19,25	21,13	22,57
II Кальцит+поры+трещины				
к	46,75	53,97		
μ	21,89	21,54		

Таб. 4 — Эффективные свойства моделей породы, полученные различными методами rock physics.

Tab. 4 — Effective properties estimated by different rock physics methods

	К, ГПа	μ, ГПа	ρ, кг/см ³
Кальцит	74,47	31,99	2,71
Доломит	91,14	49,14	2,87
Кварц	37,00	44,00	2,65
Флюид	2,25	0	1,04

Таб. 5 — Упругие модули и плотности минералов и флюида

Tab. 5 — Elastic properties and density of minerals and fluid

эффективной однородной деформации матрицы к каждому включению. Для изотропного случая оценка эффективных модулей упругости для двухфазного материала осуществляется по следующим формулам:

$$\frac{K^* - K_m}{K_i - K_m} = v_i \frac{1}{3} T_{ijj} \left[(1 - v_i) + v_i \frac{1}{3} T_{ijj} \right]^{-1}$$

$$\frac{\mu^* - \mu_m}{\mu_i - \mu_m} = v_i \frac{1}{5} (T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj}) \times \left[(1 - v_i) + v_i \frac{1}{5} (T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj}) \right]^{-1}$$

Метод Мори-Танаки имеет ряд ограничений: 1) доля включений не должна превышать 30%, в случае более высоких объемных долей метод дает неточные оценки [22]; 2) Норрис [23] показал, что оценка методом для мультикомпонентного композита лежит вне границ Хашина-Штрикмана; 3) Феррари [24] показал, что для анизотропного композита нарушается диагональная симметричность эффективного тензора упругости.

4. Дифференциальный метод эффективной среды (ДЭС)

Для устранения недостатков описанных выше методов, связанных с ограничением концентраций включений, был разработан дифференциальный метод эффективной среды [3, 25]. Его идея состоит в разделении включений на бесконечно малые порции, которые вносятся в матрицу. Для каждой следующей порции включений применяется метод самосогласования. Каждая новая порция рассматривается как внедренная в эквивалентную среду, образованную матрицей и всеми включениями, внесенными на предыдущих этапах. В изотропном случае для расчета эффективных модулей упругости получается два совместных уравнения:

$$(1 - v_i) \frac{d}{dv_i} K^* = (K_i - K^*) \frac{1}{3} T_{ijj}$$

$$(1 - v_i) \frac{d}{dv_i} \mu^* = (\mu_i - \mu^*) \frac{1}{5} (T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj})$$

Метод ДЭС очень распространен и широко применяется, но необходимо помнить, что он может быть применим в случае сред, где включения изолированы и не образуют единую связанную сеть. Также эффективные свойства зависят от очередности добавления различных пор.

5. Метод обобщенного сингулярного приближения (ОСП)

В методе обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей при решении уравнения равновесия упругой неоднородной среды используется только сингулярная составляющая тензора Грина уравнений равновесия, зависящая лишь от дельта-функции Дирака, и вводится однородное тело сравнения, материальные константы которого входят в выражения для вычисления эффективного тензора упругости [5, 6]. Тело сравнения выступает в виде некоего «эталоны» и отражает внутреннюю структуру материала, геометрическую связанность пор и жесткость матрицы.

Расчеты проводятся для материала, состоящего из произвольной анизотропной матрицы, содержащей эллипсоидальные включения различных форм и ориентаций.

$$C^* = \langle C [I - g(C - C^c)]^{-1} \rangle \times \langle (I - g(C - C^c))^{-1} \rangle^{-1},$$

где треугольные скобки означают осреднение по всем компонентам, C — тензор модулей упругости компонента, g зависит от аспектного отношения и свойств тела сравнения C^c и выражается как:

$$g_{ijkl} = -\frac{1}{16\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (n_{kj} \Lambda_{il}^{-1} + n_{ki} \Lambda_{jl}^{-1} + n_{ij} \Lambda_{lk}^{-1} + n_{li} \Lambda_{jk}^{-1}) \sin\theta d\theta d\varphi,$$

где $\theta \in [0, \pi]$ полярный угол, азимутальный угол $\varphi \in [0, 2\pi]$.

$$\Lambda_{ij} = C_{ijkl}^c n_k n_l; n_1 = \frac{\sin\theta \cos\varphi}{a_1};$$

$$n_2 = \frac{\sin\theta \sin\varphi}{a_2}; n_3 = \frac{\cos\theta}{a_3}.$$

где a_1, a_2, a_3 — оси эллипсоида

В ОСП учитывается геометрическая связанность пустотного пространства посредством эмпирического параметра f , но это осложняет решение обратной задачи, так как увеличивает количество неизвестных. Но можно взять тело сравнения C^c в виде линейной комбинации приближений Фойгта C^V и Ройсса C^R , а f брать равным объемному содержанию гидравлически связанных включений, т.е. равным эффективной пористости $\varphi_{\text{эф}}$ [19]. $C^c = (1 - \varphi_{\text{эф}}) C^V + \varphi_{\text{эф}} C^R$.

В случае, если компоненты композитного материала изотропны с учетом условия эргодичности, можно осреднение произвести по правилу механического смешивания

$$C^* = (\sum_i v_i C_i [I - g_i(C_i - C^c)]^{-1}) (\sum_i v_i (I - g_i(C_i - C^c))^{-1})^{-1},$$

где v_i — концентрация i -го компонента.

Комментарий по поводу модели Шу-Пайн

Модель Шу-Пайн [26] относится к типу гибридных моделей, которые состоят из комбинации двух или более моделей rock physics. В этой модели объединены методы ДЭС и

Кастера-Токсоза для изотропного случая. Модель Шу-Пайн является модифицированной версией модели Шу-Вайта [27] и предназначена для расчета упругих свойств карбонатных коллекторов. Предполагается, что общая пористость состоит из четырех типов пор: 1) пор, связанных с глиной, 2) межгранулярных, 3) микротрещин и 4) жестких пор. В случае «чистых» карбонатных пород рассматриваются только последние 3 типа. В предложенной Шу-Пайн [26] схеме разделены пор жесткие поры представляются как округлые поры выщелачивая или каверны. Но поры выщелачивания и каверны не обязательно имеют округлую форму [28]. При этом стоит заметить, что межзерновые поры (межгранулярные) могут иметь различную форму и относится как к «жестким» порам, так и к «мягким». Вследствие этого разделение пустот на типы, предложенные в модели [26], кажется нецелесообразным, так как сложно связать данные типы пор с фактическим пустотным пространством карбонатных пород.

В приведенной ниже таб. 3 обобщены основные характеристики рассмотренных методов.

Построение модели

Модель двойной пористости

Карбонатные породы имеют сложное строение пустотного пространства, которое представлено большим разнообразием форм и типов пор и проявляет мультимасштабность.

Пустотное пространство горной породы можно рассматривать как систему пор на одном масштабе, либо разделять ее на несколько масштабов. В первом случае, говорят о модели коллектора «двойной пористости». Под «двойной пористостью» понимают наличие двух емкостных сред: пористость межзерновой среды (матрицы) и трещинная пористость: $\varphi_{\text{общ}} = \varphi_{\text{поры}} + \varphi_{\text{трещ}}$. Можно на модель «двойной пористости» посмотреть несколько по-другому и разделить пористость на «жесткую» и «мягкую». «Жесткая» пористость — это поры с большим аспектным отношением ($\alpha > 0,1$), которые менее податливы, напротив, «мягкие» поры с меньшим аспектным отношением ($\alpha < 0,1$), более податливы и схлопываются при нагрузке. Во втором случае $\varphi_{\text{общ}} = \varphi_{\text{макро}} + \tilde{\varphi}_{\text{микро}}$, где $\tilde{\varphi}_{\text{микро}} = v_{\text{микро}} \varphi_{\text{микро}}$, $v_{\text{микро}}$ — доля микропористости, если микропористость связанная. Если микропористость закрытая, то ее включают в состав матрицы.

Рассмотрим модель двойной пористости $\varphi_{\text{общ}} = \varphi_{\text{поры}} + \varphi_{\text{трещ}}$ для разных методов rock physics. Поры будут сферическими ($\alpha_{\text{пор}} = 1$) с объемной долей 0,1, трещины — в виде монетообразных включений ($\alpha_{\text{трещ}} = 0,001$) с объемной долей 0,0008, матрица состоит из сферических зерен кальцита ($\alpha_{\text{м}} = 1$). Такие параметры подобраны, чтобы учесть ограничение метода Кастера-Токсоза (таб. 3) и сравнить все описанные выше методы (таб. 4).

В первом варианте (I) пустоты добавлялись последовательно в кальцитовую матрицу. Таким способом можно учесть неявно влияние размера включений по принципу «от меньших неоднородностей — к большему» [29]. Во втором варианте включения добавлялись одновременно. Результаты отражены в таб. 4.

На рис. 2 показаны эффективные модули упругости, рассчитанные по методу ОСП для второго варианта, в зависимости от

эмпирического параметра f . Тело сравнения в этом случае было выбрано в виде: $C^C = (1-f) C^M + f C^C$.

Анализ чувствительности модели

Анализ чувствительности заключается в оценке влияния изменения параметров модели на расчетные значения эффективных свойств. В детерминированном однофакторном анализе варьируется один выбранный параметр модели в определенных пределах, при условии, что остальные параметры остаются неизменными. Входные данные для анализа представлены в таб. 2, 5 и 6, а результаты визуализированы в виде диаграммы «торнадо».

На рис. 3 отображено влияние параметров модели «двойной пористости» на эффективные упругие модули. Коэффициент пористости является первым по значимости фактором влияния на модуль объемного сжатия и вторым для модуля сдвига, который больше подтвержден наличием трещин с маленьким аспектным отношением. При этом, если выбрать матрицу, состоящую из трех минералов: кальцита, доломита, кварца, то объемное содержание доломита будет первым влияющим фактором для модуля объемного сжатия и вторым для модуля сдвига (рис. 4). Также видно из рис. 4, что объемное содержание доломита и кальцита оказывают большее влияние, чем форма пор. Рис. 4 показывает, что при наличии микропористости,

Параметры	Мин	Макс
$\alpha_{\text{пор}}$	0,1	1
$\alpha_{\text{трещ}}$	0,0001	0,09
$v_{\text{трещ}},\%$	0,01	2
Кр, %	0,1	10
$v_{\text{кальцит}},\%$	53	83
$v_{\text{доломит}},\%$	13	48
$v_{\text{кварц}},\%$	0,4	8
$v_{\text{микро}},\%$	0,6	12

Таб. 6 — Параметры модели
Tab. 6 — Model parameters

она становится вторым по значимости фактором для обоих модулей.

Определение параметров модели

Для карбонатных образцов групп 1 и 2 была выбрана следующая модель: матрица и хаотические ориентированные пустоты (микропористость, поры и трещины). Упругие свойства матрицы считались неизвестными, так как породы могут содержать закрытую пористость, органическое вещество и связанную воду. Обратная задача по определению параметров модели (аспектное отношение пор, аспектное отношение трещин, трещинная пористость) решалась методом Монте-Карло, основанным на случайных реализациях модели.

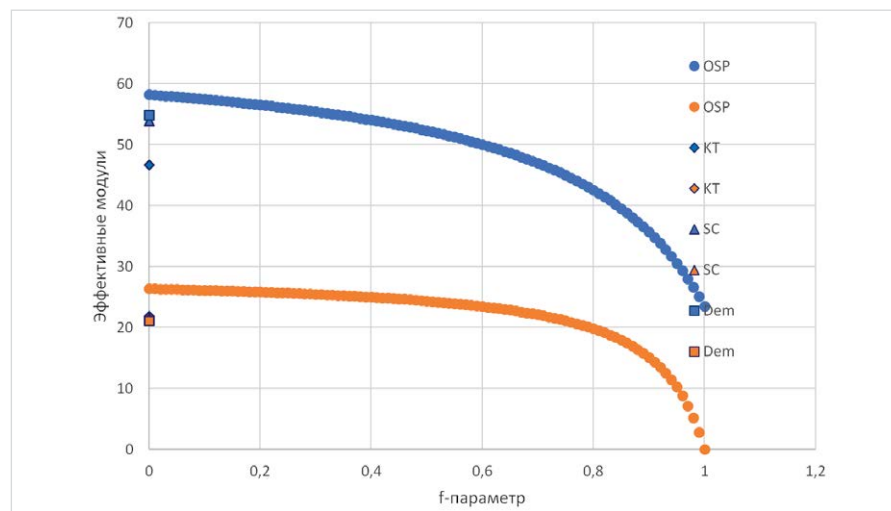


Рис. 2 — Эффективные модули упругости: синие — модуль всестороннего сжатия, оранжевый — модуль сдвига

Fig. 2 — Effective elastic properties: blue — bulk modulus, orange — shear modulus

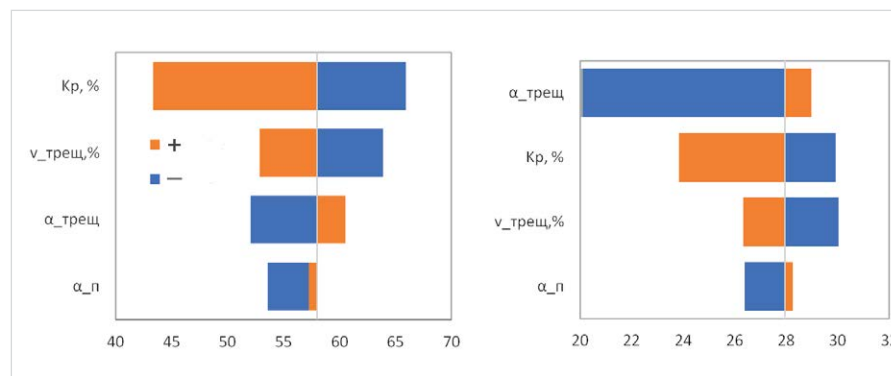


Рис. 3 — Влияние параметров модели «двойной пористости» на модуль объемного сжатия (а) и модуль сдвига (б)

Fig. 3 — Influence of double porosity model parameters on bulk (a) and shear moduli (b)

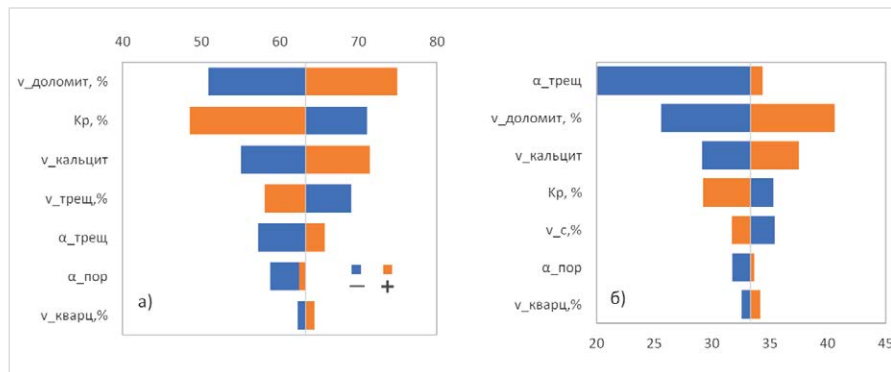


Рис. 4 — Влияние параметров модели «двойной пористости» и содержания поробразующих минералов на модуль объемного сжатия (а) и модуль сдвига (б)
 Fig. 4 — Influence of double porosity model parameters and volume concentration of minerals on bulk (a) and shear moduli (b)

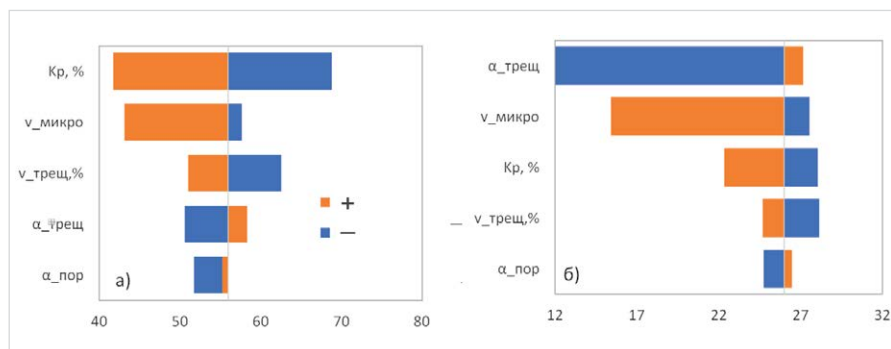


Рис. 5 — Влияние параметров модели «двойной пористости» и микропористости на модуль объемного сжатия (а) и модуль сдвига (б)
 Fig. 5 — Influence of double porosity model parameters and microporosity on bulk (a) and shear moduli (b)

Параметры	2 группа (микритовый известняк)	1 группа (биокластовые)	
α_пор	0,5	0,5	0,1
α_трещ	0,009	0,007	0,007
v_трещ,%	0,05	0,1	0,1
Km	74,7	57,1	74,5
μm	31,25	34,4	23,3

Таб. 7 — Осредненные параметры моделей
 Tab. 7 — Averaged model parameters

Эффективные упругие модули оценивались методом ОСП с телом сравнения в виде: $C^C = (1 - \varphi_{эф})C^V + \varphi_{эф}C^R$. В качестве решения принимались те значения параметров модели, которые обеспечивали приемлемое расхождение между экспериментальными значениями скоростей продольных волн и теоретическими значениями, рассчитанные по эффективным упругим свойствам. Расхождение было выбрано равным стандартному отклонению продольных или поперечных волн, измеренных на стандартных образцах. Чтобы сузить область решений обратной задачи, задавались ограничения: на аспектные отношения — на основе анализа микроструктуры, на количество трещинной пористости по литературным данным, на модули матрицы — исходя из минерального состава пород и определенного количества закрытой пористости (таб. 2). Входные величины для решения обратной задачи: скорости упругих волн, плотность, пористость и микропористость. Искомые осредненные параметры отображены в таб. 7.

Итого

Проведен обзор наиболее распространенных методов rock physics: Кастера-Токсоза, самосогласования, дифференциальной схемы, Мори-Танака, обобщенного сингулярного приближения, где матрица состоит из кальцита, а пустотное пространство рассматривается как модель двойной пористости. Построены параметрические математические модели изотропных упругих свойств трех типов карбонатных пород.

Выводы

На основе проведенного обзора составлена обобщающая таблица по методам rock physics, отражающая их важные для моделирования характеристики. Приведенные методы — аппроксимационные, так как оценка эффективных свойств сводится к задаче взаимодействия многих тел, которая не имеет точного решения. В основе данных методов лежат разные теории, например, для метода Кастера-Токсоза — это теория рассеивания, а

для метода ОСП — решение уравнение равновесия для случайных полей. Поэтому в общем случае результаты, полученные различными методами, будут отличаться. Для изотропной породы и малых значений пористости данные методы дают близкие оценки эффективных свойств. Анализ чувствительности показал, что главные факторы, влияющие на эффективные упругие свойства — это общая пористость, минеральный состав и микропористость. Из найденных параметров модели следует, что упругие модули микритового цемента почти равны модулям мономинерала кальцита.

Литература

1. Kuster G.T., Toksoz M.N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media // Geophys, 1974, issue 39, pp. 587–618.
2. Berryman J.G. Long-wavelength propagation in composite elastic media I Spherical inclusions, II Ellipsoidal inclusions // The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, V.68, issue 6, pp. 1820–1831.
3. Norris A.N. A differential scheme for the effective moduli of composites // Mechanics of Materials, 1985, V.4, issue 1, pp. 1–16.
4. Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials // Mechanics of Materials, 1987, V.6, issue 2, pp. 147–157.
5. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронероводных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
6. Bayuk I.O., Chesnokov E.M. Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media // Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1998, V.23, issue 3, pp. 361–366.
7. 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.
8. Патент RU 2515332. Способ определения неоднородностей упругих и фильтрационных свойств горных пород. Приоритет от 18.09.2012, кл. G01N15/08.
9. Морозов В.П., Королев Э.А., Кольчугин А.Н. Карбонатные породы визейского, серпуховского и башкирского ярусов нижнего и среднего карбона // Казань: ПФ Гарт. 2008. 182 с.
10. Баяк И.О. Междисциплинарный подход к прогнозированию макроскопических и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородов // Москва: ИФЗ РАН. 2013. 228 с.
11. 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.
12. Fournier F., Leonide Ph., Biscarrat K., Gallois A., Borgomano J. and Foubert A.A. Elastic properties of microporous cemented grainstones // Geophysics, 2011, V.76, issue 6, pp. e211–e226.
13. Fournier F., Leonide Ph., Kleipool L., Toullec R., Reijmer J.G.J. and others. Pore space evolution and elastic properties of platform carbonates (Urgonian limestone, Barremian–Aptian, SE France) // Sedimentary Geology, 2014, V.308, pp. 1–17.

14. Neto I.A.L., Misságia R.M., Ceia M.A., Archilha N.L., Oliveira L.C. Carbonate pore system evaluation using the velocity–porosity–pressure relationship, digital image analysis, and differential effective medium theory // *Journal of Applied Geophysics*, 2014, V.110, pp. 23–33.
15. Sayers C.M. The elastic properties of carbonates // *Leading Edge*, 2008, V.27, pp. 1020–1024.
16. Agersborg R., Johansen T.A., Jakobsen M. The T-matrix approach for Carbonate rocks // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, pp. 1597–1600.
17. Alkhimenkov Yu.A. Practical Applications of the T-Matrix Approach to Fractured Porous Rocks // *Society of Petroleum Engineers*, 2015.
18. Alkhimenkov Yu. A., Bayuk I. O. Analysis of Anisotropy Parameters of Fractured Carbonate Reservoir. Extended Abstract // 6th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, 2014.
19. Баяк И.О., Рыжков В.И. Определение параметров трещин и пор карбонатных коллекторов по данным волнового акустического каротажа // *Технологии сейсморазведки*. 2010. №3. С. 32–42.
20. Berryman J.G., Berge P.A. Critique of two explicit schemes for estimating elastic properties of multiphase composites // *Mechanics of Materials*, 1996, V.22, issue 2, pp.149–164.
21. Kachanov M. Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts // *Applied Mechanics Reviews*, 1992, V.45, issue 8, pp. 304–335.
22. Parsaee A., Shokrieh M.M., Mondali M. A micro-macro homogenization scheme for elastic composites containing high volume fraction multi-shape inclusions// *Computational Materials Science*, 2016, V.121, pp. 217–224.
23. Norris A.N. An Examination of the Mori-Tanaka Effective Medium Approximation for Multiphase Composites // *Journal of Applied Mechanics*, 1989, V.56, issue 1, pp. 83–88.
24. Ferrari M. Asymmetry and the high concentration limit of the Mori-Tanaka effective medium theory // *Mechanics of Materials*, 1991, V.11, issue 3, pp. 251–256.
25. Berryman J.G., Pride S.R., Wang H.F. A differential scheme for elastic properties of rocks with dry or saturated cracks // *Geophys. J. Int.*, 2002, V.151, pp. 597–611.
2. Xu S., Payne M.A. Modeling elastic properties in carbonate rocks // *The Leading Edge, Rock physics*, 2009, V.28, pp. 66–74.
27. Xu S., White R. A new velocity model for clay-sand mixtures // *Geophysical prospecting*, 1995, V.43, pp. 91–118.
28. Багринцева К.И., Бочко Р.А., Дмитриевский А.Н. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. М., 2003. 264 с.
29. 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.

Rock physics modeling of carbonates: a review of effective medium theory methods and aspects of their applicability

Author

Irina A. Berezina — Ph.D. student, engineer; irene.berezina@gmail.com

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

Abstract

The article reports an overview of effective media methods in the context of computation elastic properties of rocks (Rock Physics) with constraints of applicability. For comparison purposes, several methods were applied to estimate effective elastic properties of modeled space consisting of the calcite matrix and the pore space divided according to double porosity model. For the three types of carbonate rocks parameter-oriented elastic models on the core scale were constructed based on generalized singular approximation method, using data of rocks microstructure analysis at various scales, as well as measurements of the elastic waves velocities on the standard samples. The parameters of petroelastic models were obtained during solving the inverse problem.

Materials and methods

Methods of effective medium theory, Fortran programming language, IMSL Fortran library.

Keywords

carbonate rocks, rocks physics methods, petroelastic modeling

Results

Author provided a review of the most common methods of rock physics: Kuster-Toksoz, self-consistency, differential scheme, Mori-Tanaka, generalized singular approximation, in case of the matrix consisting of calcite, and the pore space, considering as the dual porosity model. Parametric-oriented mathematical models of the isotropic elastic properties for three types of carbonate rocks are constructed.

Conclusions

The paper presented a comparative analysis of the rock physics methods and highlighted their important features for petro-elastic modeling of hydrocarbon reservoirs. All examined methods are approximation schemes since effective properties evaluation is reduced to the problem of many bodies interaction,

which does not have an exact solution. In general, the results obtained by different methods will vary due to the difference in theoretical approaches to the modeling of stress and strain fields. For isotropic rock and small porosity values, the considered methods give close estimates of the effective properties. The sensitivity analysis of petro-elastic models of carbonate rocks showed that the main influence on the effective elastic properties caused by total porosity, mineral composition, and microporosity. The information about the microstructure of rocks at different scales, pore space morphology, and connectivity of pores maximize the success of petro-elastic modeling. Also, this information allows calibrating the porosity parameters in the model to types of porosity actually presented in the rock. From the analysis of the simulation results, it follows that the micritic elastic moduli are almost equal to the moduli of the monomineral polycrystal of calcite.

References

- Kuster G.T., Toksoz M.N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media // *Geophys*, 1974, issue 39, pp. 587–618.
- Berryman J.G. Long-wavelength propagation in composite elastic media I Spherical inclusions, II Ellipsoidal inclusions // *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, V.68, issue 6, pp. 1820–1831.
- Norris A.N. A differential scheme for the effective moduli of composites // *Mechanics of Materials*, 1985, V.4, issue 1, pp. 1–16.
- Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials // *Mechanics of*

- Materials, 1987, V.6, issue 2, pp. 147–157.
5. Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of micro-inhomogeneous media]. Moscow: Science, 1977, 400 p.
 6. Bayuk I.O., Chesnokov E.M. Correlation between elastic and transport properties of porous cracked anisotropic media // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1998, V.23, issue 3, pp. 361–366.
 7. Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Gilyazetdinova D.R., Krasnova M.A., Korost D.V. and others. *Seysmoakusticheskie issledovaniya kerna pri plastovykh usloviyakh* [Seismo-acoustic core studies at reservoir conditions] // *Seismic technologies*, 2015, issue 2, pp. 36–45.
 8. Patent RU 2515332. *Sposob opredeleniya neodnorodnostey uprugikh i fil'tratsionnykh svoystv gornykh porod* [The method of determining the heterogeneity of elastic and filtration properties of rocks]. Priority from 18.09.2012, kl. G01N15/08.
 9. Morozov V.P., Korolev E.A., Kol'chugin A.N. *Karbonatnye porody vizeyskogo, serpukhovskogo i bashkirskogo yarusov nizhnego i srednego karbona* [Carbonate rocks of the Viséan, Serpukhov and Bashkir tiers of the lower and middle Carboniferous] // *Kazan: PF Garth*, 2008, 182 p.
 10. Bayuk I.O. *Mezhdistiplinarnyy podkhod k prognozirovaniyu makroskopicheskikh i fil'tratsionno-embkostnykh svoystv kollektorov uglevodorodov* [Interdisciplinary approach to forecasting the macroscopic and filtration-capacitive properties of hydrocarbon reservoirs]. Moscow: IPE RAS, 2013, 228 c.
 11. 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.
 12. Fournier F., Leonide Ph., Biscarrat K., Gallois A., Borgomano J. and Foubert A.A. Elastic properties of microporous cemented grainstones // *Geophysics*, 2011, V.76, issue 6, pp. e211–e226.
 13. Fournier F., Leonide Ph., Kleipool L., Toullec R., Reijmer J.G.J. and others. Pore space evolution and elastic properties of platform carbonates (Urgonian limestone, Barremian–Aptian, SE France) // *Sedimentary Geology*, 2014, V.308, pp. 1–17.
 14. Neto I.A.L., Misságia R.M., Ceia M.A., Archilha N.L., Oliveira L.C. Carbonate pore system evaluation using the velocity–porosity–pressure relationship, digital image analysis, and differential effective medium theory // *Journal of Applied Geophysics*, 2014, V.110, pp. 23–33.
 15. Sayers C.M. The elastic properties of carbonates // *Leading Edge*, 2008, V.27, pp. 1020–1024.
 16. Agersborg R., Johansen T.A., Jakobsen M. The T-matrix approach for Carbonate rocks // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, pp. 1597–1600.
 17. Alkhimenkov Yu.A. Practical Applications of the T-Matrix Approach to Fractured Porous Rocks // *Society of Petroleum Engineers*, 2015.
 18. Alkhimenkov Yu.A., Bayuk I.O. Analysis of Anisotropy Parameters of Fractured Carbonate Reservoir. Extended Abstract // 6th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, 2014.
 19. Bayuk I.O., Ryzhkov V.I. *Opredelenie parametrov treshchin i por karbonatnykh kollektorov po dannym volnovogo akusticheskogo karotazha* [Determination of parameters of cracks and pores of carbonate reservoirs according to wave acoustic logging data] // *Technologies of seismic prospecting*, 2010, issue 3, pp. 32–42.
 20. Berryman J.G., Berge P.A. Critique of two explicit schemes for estimating elastic properties of multiphase composites // *Mechanics of Materials*, 1996, V.22, issue 2, pp.149–164.
 21. Kachanov M. Effective elastic properties of cracked solids: critical review of some basic concepts // *Applied Mechanics Reviews*, 1992, V.45, issue 8, pp. 304–335.
 22. Parsaee A., Shokrieh M.M., Mondali M. A micro-macro homogenization scheme for elastic composites containing high volume fraction multi-shape inclusions // *Computational Materials Science*, 2016, V.121, pp. 217–224.
 23. Norris A.N. An Examination of the Mori-Tanaka Effective Medium Approximation for Multiphase Composites // *Journal of Applied Mechanics*, 1989, V.56, issue 1, pp. 83–88.
 24. Ferrari M. Asymmetry and the high concentration limit of the Mori-Tanaka effective medium theory // *Mechanics of Materials*, 1991, V.11, issue 3, pp. 251–256.
 25. Berryman J.G., Pride S.R., Wang H.F. A differential scheme for elastic properties of rocks with dry or saturated cracks // *Geophys. J. Int.*, 2002, V.151, pp. 597–611.
 26. Xu S., Payne M.A. Modeling elastic properties in carbonate rocks // *The Leading Edge, Rock physics*, 2009, V.28, pp. 66–74.
 27. Xu S., White R. A new velocity model for clay-sand mixtures // *Geophysical prospecting*, 1995, V.43, pp. 91–118.
 28. Bagrintseva K.I., Bochko R.A., Dmitrievskiy A.N. *Atlas karbonatnykh kollektorov mestorozhdeniy nefti i gaza Vostochno-Evropeyskoy i Sibirskoy platform* [Atlas of carbonate reservoirs of oil and gas fields of the East European and Siberian platforms]. Moscow, 2003, 264 p.
 29. 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.

СЕМИНАР-КОНФЕРЕНЦИЯ

03–07 июня 2019

«Инновационные решения в области КРС, ПНП, ГНКТ, внутрискважинные работы и супервайзинг в горизонтальных и разветвленных скважинах»

09–13 сентября 2019

«Эксплуатация – добыча нефти и газа, ремонт и бурение горизонтальных скважин»

+7 (3452) 534 009
 togc@bk.ru, in_tech@bk.ru
 WWW.TOGC.INFO



НЕФТЬ ГАЗ
ЭКСПОЗИЦИЯ
 Генеральный информационный партнер

