

Геофизические технологии, № 4, 2022, с. 75–88 doi: 10.18303/2619-1563-2022-4-75 **www.rjgt.ru** УДК 550.834

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А.Ю. Задоев^{1,2}, Т.А. Петроченко³, Ю.А. Орлов^{1,2}, А.А. Дучков^{1,3}, Г.М. Митрофанов^{1,3}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

³Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия e-mail: MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru

В работе рассматриваются вопросы выбора материалов для создания физических моделей в сейсморазведке. Основное внимание уделяется соответствию акустических параметров материалов модели свойствам пород реальной геологической среды. Также предлагается методика измерения коэффициента поглощения упругих волн в лабораторных условиях.

Физическое моделирование, акустические параметры материала, исходный импульс, коэффициент поглощения

METHODOLOGY OF PHYSICAL MODELS PARAMETERS DETERMINING FOR SEISMIC EXPERIMENTS

A.Yu. Zadoev^{1,2}, T.A. Petrochenko³, Yu.A. Orlov^{1,2}, A.A. Duchkov^{1,3}, G.M. Mitrofanov^{1,3}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, ²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia, ³Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia, e-mail: MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru

The issues of choosing materials for creating physical models into seismic exploration are considered. The main attention is paid to the correspondence of the acoustic parameters of the materials used in the preparation of the model to the properties of the rocks of the real medium. A technique is proposed for measuring the attenuation coefficient in materials that serve as the main elements of the formed physical model.

Physical modeling, acoustics parameters of materials, an initial impulse, an attenuation coefficient

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду истощения и хорошей изученности крупных месторождений нефти и газа все больший интерес в сейсморазведке начинают приобретать мелкие месторождения, характеризующиеся сложной геологической структурой. Для эффективного анализа и оценки запасов таких месторождений требуются знания о распространении упругих волн в сложнопостроенных средах, при этом регистрируемые в процессе полевых работ эффекты могут выходить за пределы актуальных теоретических представлений. Для получения новых знаний требуется выполнение дополнительных исследований – регистрация и детальный анализ реальных данных, прежде всего. Альтернативным подходом к их получению (по

отношению к полевым работам на хорошо изученных полигонах) являются исследования, выполняемые на физических моделях. Это направление имеет богатую историю [Ивакин, 1969; Hilterman, 1970; Аверко, Максимов, 1984; Ebrom, McDonald, 1994] и органично дополняет другие методы и подходы. С использованием физических моделей с детально известными физическими свойствами изучаются вопросы, связанные с особенностями распространения сейсмических волн в средах со сложной структурой.



Рис. 1. Система для изучения поверхностных волн Релея [Terada, Tsuboi, 1927]. Обозначения: *С* – канал, *М* – среда, *m* – зеркала, *S* – источник вибрации

Опыты по сейсмическому моделированию начали проводиться в начале 20-х годов прошлого столетия в Японии. На их основе исследовалось влияние рвов на распространение волн Рэлея [Terada, Tsuboi, 1927] (рис. 1). В качестве источника волн ученые использовали латунный шар, в котором с помощью ударов возбуждались колебания. Приемником служила система, состоящая из расставленных на поверхности модели вогнутых зеркал, которые отражали на экран направленный на них свет и таким образом служили индикатором распространения волны Рэлея. С развитием технологий аппаратура для физического моделирования прошла путь от регистраторов-самописцев в первой половине века до полуавтоматизированных и автоматизированных установок, которые использовались, например, в работах Фреда Гильтермана [Hilterman, 1970] и Била Френча [French, 1974]. В первой работе возбуждение волны происходило с помощью искрового разряда, а во второй в качестве источников волн применялись ультразвуковые пьезокерамические излучатели. На рисунке 2 показана физическая модель, использовавшаяся во второй работе.



Рис. 2. Фотография модели, содержащая два поднятия и разлом [French, 1974]

В настоящее время исследования методом физического моделирования требуют еще большей автоматизации и крайне высокого уровня знаний о строении моделей – при их создании и исследовании используются такие технологии, как лазерное сканирование, 3D печать, прецизионные измерения акустических свойств и т. д.

Отметим еще один важный аспект: несмотря на развитие современных вычислительных технологий, существуют области, где численное моделирование не может предоставить корректное и полное решение [Evans et al., 2007]. В частности, наиболее характерными являются следующие геологические ситуации:

- приповерхностные аномалии неправильной формы;
- структурно сложнопостроенные среды соляные диапиры и надвиговые зоны;
- трещиноватые и флюидонасыщенные среды, в т. ч. их поведение в динамике при проведении гидроразрыва пласта.

В целом, результаты, получаемые в ходе физического моделирования, побудили различные компании финансировать создание лабораторий и проведение исследований в этой области. Подобные эксперименты проводятся в Китае [Wang et al., 2018], Канаде [Chang et al., 1994; Wong et al., 2009; Dulaijin et al., 2015], Австралии [Sherlock et al., 2000], России [Попов и др., 2016].

Помимо вопросов, связанных с разработкой аппаратуры и методологии работ, важнейшими являются задачи создания физических моделей, в том числе правильного подбора материалов, используемых при их изготовлении. Представленная работа посвящена решению именно этих задач. При этом наибольшее внимание уделяется рассмотрению определения физических свойств материалов, которые могут являться базовыми при построении моделей.

ПОДГОТОВКА К СОЗДАНИЮ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Принцип физического моделирования заключается в создании упрощенных моделей геологических объектов из материалов, параметры которых близки или подобны свойствам реальных сред. Основными такими параметрами являются скорости продольных и поперечных волн, плотность, геометрические размеры, частоты исследуемых сигналов. При условии равенства скоростей и плотностей в соответствующих частях реальной среды и модели, константа геометрического подобия (коэффициент масштаба) *CI* обратно пропорциональна константе подобия по частоте *Cω* [Ивакин, 1969; Brown et al., 1991; Chang, Gardner, 1997]. В нашем случае коэффициент масштаба составляет 10 000.



Рис. 3. Образцы материалов

Для того чтобы подобрать материалы, которые удовлетворяют вышеописанному условию подобия плотностей и скоростей, перед созданием модели необходимо сначала провести измерения этих параметров в широком спектре доступных материалов. При этом, исходя из задач моделирования, могут использоваться самые разные материалы – от металлов до композитов и смесей на основе бетона.

Нами было подготовлено 27 образцов, состоящих как из нескольких компонентов (песок, цемент, добавки), так и из одного (пластик, металл). На рисунке 1 представлена часть изготовленных образцов для измерения. В таблицах 2–5 перечислены образцы, параметры которых были измерены.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ

Подготовка к проведению измерений

Для проведения измерений скоростей распространения волн в среде использовались пьезокерамические преобразователи продольных и поперечных волн с центральной частотой 300 кГц. Датчики устанавливались на противоположных гранях исследуемого образца. Для лучшего контакта поверхности преобразователей смазывались вазелином. Один из датчиков, подключенный к генератору сигналов, возбуждал в образце звуковую волну, а второй ее регистрировал. Регистрация осуществлялась с помощью 14-ти битного осциллографа с частотой дискретизации 100 МГц.

Проведение измерений

Время пробега волны измерялось по времени первого вступления. При ином способе снятия времен – по любой из регистрируемых фаз или по переходу записи через ноль, ошибочно будут определяться не только абсолютные значения скоростей, но и относительные, так как с увеличением длины пробега волны изменяется форма регистрируемого импульса.

Для проверки данного утверждения был проведен эксперимент с образцом из изотропного стекла марки К8, имеющего форму параллелепипеда. Линейные размеры образца 79.5 × 49.6 × 49.6 мм. На рисунке 4 показаны зарегистрированные сейсмотрассы, полученные прямым просвечиванием по трем ортогональным направлениям. Цветными метками на рисунке показаны положения первых вступлений (красным) и первых минимумов (синий). В таблице 1 приведены времена пробега (после масштабирования) при том и другом методе получения времен, линейные размеры образца и рассчитанные по этим показаниям скорости продольной волны. Номера трасс на рис. 4 совпадают с номерами направлений в табл. 1. При регистрации времен первых вступлений волны, как и ожидается, определяемые скорости во всех трех направлениях примерно равны. Если же рассматривать первую отрицательную фазу волны, то скорости распространения в разных направлениях разные и зависят от длины пробега.

Таблица 1

		-	-			
Направление	Линейный	Время первого	Скорость по	Время	Скорость по	
	размер, мм	вступления, мс	первому	первого	первому	
			вступлению, м/с	минимума, мс	минимуму, м/с	
I	79.5	141	5638.30	148	5371.62	
II	49.6	88	5636.36	96	5166.67	
III	49.6	88	5636.36	96	5166.67	

Линейные размеры, времена пробега и вычисленные скорости распространения звуковых волн в образце стекла марки К8

А.Ю. Задоев и др., Геофизические технологии, 2022, 4, 75-88



Рис. 4. Сейсмотрассы, полученные при просвечивании стекла марки К8 в трех ортогональных направлениях. Красным показана пикировка первых вступлений волны, синим – первый минимум

Далее во всех экспериментах время пробега волны определялось по времени первого вступления. При определении времени первого вступления необходимо учитывать тот факт, что в пористых материалах, фронт импульса затягивается и имеет плавную форму, что вносит погрешность в измерение первого вступления. В нашем случае аппаратная погрешность для *P*-волн составляет 0.1 мкс, а для *S*-волн – 0.2 мкс (до масштабирования).

После проведения измерений времен пробега волны в образце (рис. 5) определялись их линейные размеры. Для этого использовался штангенциркуль с ценой деления 0.1 мм. По результатам измерений вычислялась скорость в образцах. Относительная погрешность измерения скорости не превышает 1 %.

Результаты измерений

В таблице 2 приведены измеренные скорости и плотности образцов с различным содержанием песка (П), цемента (Ц), воды (В). При изготовлении образцов вода добавлялась в смесь в соответствии с рекомендациями производителя и составляла одну четвертую от объема. Стоит отметить, что скорость звука в некоторых образцах уже измерялась ранее (*V*po). Однако ввиду того, что подобные материалы подвержены усадке, в течение которой изменяются их свойства, были проведены повторные измерения (*V*pn).

Таблица 2

Nº	Состав песок : цемент	Плотность, г/см ³	Vро, км/с	Vpn, км/с	Vs, км/с	Гамма	Vp1/Vp2, %
M3	1:0.1	1.76	1.7	1.84	0.98	0.53	19.5
M4	1:0.2	1.96	2.54	2.14	1.31	0.61	2.9
M5	1:0.3	2.03	2.97	2.78	1.64	0.59	0.4
M6	1:0.4	1.98	3.3	2.76	1.67	0.61	2
M7	1:0.5	1.94	3.16	2.71	1.72	0.63	1.1
M8	1:1	1.94	3.35	_	_	_	0.7

Плотностные и скоростные характеристики пескобетонных смесей

В некоторых образцах измерение продольных скоростей производилось в двух направлениях. В последнем столбце табл. 2 показан процент изменения скоростей при этих двух измерениях. Зависимости непостоянства скоростей от состава смеси не наблюдается. Приведенные измерения изменчивости скоростей производились на образцах после застывания и усадки. Во всех случаях, кроме образца МЗ, изменчивость скоростей не превышает трех процентов.

Результаты измерения показали, что при увеличении содержания песка в смеси с 0.1 весовой доли до 0.5, скорость продольных волн увеличивается с 1.7 до 3.16 км/с. Скорость поперечных волн изменяется от 0.98 до 1.72 км/с.

В таблице 3 приведены измерения образцов с различным содержанием песка, цемента, воды и добавок: пластификатора CemPlast и SuperTOP российского производства.

Таблица 3

Плотность, Vpo, Vpn, N⁰ Состав Vs, км/с Гамма г/см3 км/с км/с M20 60:12:5.6:0 1.85 3.11 3.15 1.76 0.56 Песок, г: M21 _ 60:60:25:0 2.06 3.17 1.73 _ Цемент. г : Вода, мл: M22 60:60:25:0.5 2.08 3.38 3.32 1.91 0.58 CemPlast, мл M23 1.93 60:60:30:0.5 3.06 _ _ _ SuperTOP, r: M24 Вода, мл : 120:17:00 2.18 3.63 3.69 2.04 0.55 CemPlast, мл

Плотностные и скоростные характеристики пескобетонных смесей с добавлением пластификатора CemPlast

Как видно из полученных измерений, изменяя состав смеси, можно получить широкий диапазон скоростных свойств материалов для моделирования.

Отметим, что в образцах МЗ и М24 скорости продольных волн при повторном измерении оказались несколько выше, чем при первоначальном измерении. На рисунке 6 представлены графики изменения скорости продольных волн в некоторых образцах с течением времени. Ось времени построена в логарифмической шкале. Из представленных графиков видно, что менее всего подвержен усадке образец М24.



Рис. 5. Измерение скорости звука в образце

А.Ю. Задоев и др., Геофизические технологии, 2022, 4, 75-88



Рис. 6. Изменение скорости звука в образцах с течением времени

Были проведены измерения образцов из песка и цемента с добавлением армирующей фибры. Так были рассмотрены три образца с постоянным соотношением песка и бетона, но разным содержанием стекловолоконной фибры марки «Крепыш» (производитель Атекс) – от 0 до 3 гр. на 100 гр. песка и 35 гр. цемента. Результаты измерений отображены в табл. 4 (строки 1–3). В строках 4 и 5 той же таблицы показаны результаты измерений в образцах с постоянным количеством фибры, но разным количеством цемента. Такие же пропорции основных компонентов у образцов М4 и М1 в табл. 2. Добавление фибры в состав смеси снижает скоростные и плотностные характеристики материала.

Таблица 4

	Тип фибры	Состав	Плотность, г/см ³	<i>V</i> р, км/с	Vs, км/с	Гамма	Vp1/Vp2, %
1		100:35:00	1.88	3.44	1.87	0.54	1.8
2	Стекловолокно	100:35:0.6	1.9	3.21	1.85	0.58	2
3	«Крепыш»	100:35:3.0	1.52	1.89	1.27	0.67	6.1
4	•	100:20:1.5	1.68	2.28	1.16	0.51	1.1
5		100:10:1.5	1.58	1.51	0.92	0.61	4.2
6	Поли-	100:20:1.5	1.76	2.27	_	_	5.3
7	пропиленовая	100:10:1.5	1.68	1.42	_	_	8.9

Плотностные и скоростные характеристики пескобетонных смесей с добавлением фибры

В строках 6 и 7 табл. 4 показаны характеристики образцов с соотношением песок : цемент таким же, как и в строках 4 и 5, но стекловолоконная фибра заменена на полипропиленовую (изготовитель «Цеммикс»). Измерение скорости поперечных волн в этих образцах не производились.

Результаты измерений показали, что замена материала фиброволокна незначительно повлияла на скоростные и плотностные характеристики.

Анализируя эти результаты, мы видим, что добавление фибры в пескобетонную смесь приводит к уменьшению плотности образца и скоростей распространения звуковых волн, с одновременным

повышением скоростей продольных и поперечных волн. Добавление фибры при изготовлении смеси позволяет избежать растрескивания модели при высыхании. Однако следует учитывать, что такую смесь трудно вымешивать до гомогенного состояния, она тяжело формируется и подвержена образованию воздушных пузырей.

Измерение скорости продольных волн в данных образцах производилось в двух поперечных направлениях. Линейные размеры образцов в этих направлениях были равны 30 и 50 мм. В последнем столбце табл. 4 показан процент изменения скоростей при этих двух измерениях. Почти во всех случаях скорость продольных волн оказалась больше при измерении большего линейного размера. Такой результат говорит о приобретенной во время застывания смеси скоростной анизотропии. В дальнейшем предполагается изучить указанный эффект, т. к. четкой корреляции величины анизотропии скоростей в полученных образцах с составом смеси не прослеживается.

Таблица 5 включает пластики и другие гомогенные материалы. Представленные в таблице пластики имеют различную твердость, определяемую по шкале Шора (40A, 90A, 95A, 70D). Указанная твердость заявлена производителем, и дополнительно авторами не измерялась. В мягких образцах пластика, с твердостью, измеренной по шкале А, поперечные волны не зафиксированы. Плотность пластиков изменяется незначительно и зависит скорее от производителя, чем от заявленной твердости. Как видно из табл. 5, скорость распространения продольных звуковых волн в образцах в общем случае растет с увеличением твердости. В случаях, когда удалось уверенно зафиксировать поперечные волны, параметр гамма определяется критично низким, равным 0.35 и 0.36. Этот результат важно учитывать при проведении экспериментов, направленных на решение динамических задач сейсмики.

Таблица 5

Образец	Твердость по Шору	Плотность, г/см ³	Vр, км/с	Vs, км/с	Гамма
Пластик (VitaFlex)	40A	1.07	1.46	-	-
Пластик (Силагерм)	90A	1.07	1.71	-	
Пластик (Силагерм)	95A	1.07	1.68	-	-
Пластик(ЕракастTLC)	70D	1.11	1.84	0.64	0.35
Пластик (Polycast)	70D	1.04	1.85	0.66	0.36
Стекло	_	2.3	5.54	3.14	0.57
Акрил экструзионный мощность 21 мм	_	1.2	2.74	1.35	0.49
Акрил литьевой мощность 50 мм	_	1.18	2.64	_	_
Алюминий В-95	_	2.7	6.1		_

Плотностные и скоростные характеристики некоторых пластиков и других гомогенных материалов

Скоростные и плотностные характеристики акрила (оргстекла) нельзя считать определенными, в табл. 5 приведены значения для двух образцов разной толщины, изготовленных по разной технологии. Плотность варьируется в пределах 1.5 %, скорость продольных волн изменяется в пределах 4 %. По своим скоростным характеристикам акриловое стекло могло бы с успехом моделировать песчаники, однако плотность у этого материала довольно низкая и близка к углям.

Стекло и алюминий по своим скоростным и плотностным характеристикам могут использоваться для моделирования магматических пород.

Для сравнения с акустическими характеристиками реальных сред мы приводим табл. 6, в которой указаны примерные интервалы плотностей и скоростей звука для некоторых пород.

Таблица 6

Порода	Плотность, г/см ³	<i>V</i> р, км/с	<i>V</i> s, км/с	Гамма	
Перидотиты	2.9–3.3	7.8–8.2	4.1–4.5	0.54	
Габбро	2.94	6.40	3.65	0.57	
Базальты	2.81	5.50	2.95	0.54	
Диабазы	3.02	6.40	3.65	0.57	
Диориты	2.80	6.20	3.55	0.57	
Сиениты	2.66	6.15	3.25	0.53	
Граниты	2.62	5.60	3.20	0.57	
Гнейсы	2.62	5.80	3.05	0.53	
Песчаники	1.8–2.9	1.8–4.0	0.7–2.1	0.48	
Доломиты	18.20		10.05	0.55	
Известняки	1.8–3.0	2.5-6.0	1.2-3.5	0.55	
Мергель	2.3–2.8	2.0–3.5	0.3–1.8	0.40	
Нефть	0.8–1.0	1.3–1.4	_	-	
Эклогит	3.27	7.45	_	-	
Амфиболит	3.09	6.08	4.20	0.69	

Акустические свойства некоторых пород [Бродовой и др., 1988; Богословский и др., 2018]

Измерение поглощения в оргстекле

Помимо акустической жесткости важным параметром, который нужно учитывать при создании модели, является также коэффициент поглощения в материале. В данной работе была проведен эксперимент по определению этого коэффициента в таком материале как оргстекло (акрил экструзионный), которое в дальнейшем использовалось для создания моделей.

Для проведения эксперимента использовалось следующее оборудование (рис. 7):

- цифровой осциллограф TDS-1012 (частота дискретизации 100 МГц);
- усилитель сигнала ультразвуковой эхоскоп GS 200;
- ультразвуковые датчики 2 МГц с диаметром элемента 36 мм;
- емкость с водой.

В качестве исследуемых объектов выступали пластины оргстекла с толщинами 10, 20.4 и 4.7 мм.



Рис. 7. Оборудование для измерения поглощения

Выполняемый эксперимент заключался в следующем: сначала к плоскопараллельным граням сосуда с водой с помощью эластичной нити прижимались ультразвуковые датчики. Для лучшего соприкосновения со стенками сосуда поверхность датчиков была смазана специальным раствором. Затем в емкость с водой помещался исследуемый образец. После этого на один из датчиков (источник) подавался сигнал (импульс Дирака) с частотой 2 МГц и в среде (вода, оргстекло) возбуждалась ультразвуковая волна.

Второй датчик, выступающий в роли приемника, регистрировал прошедшую через оргстекло и воду волну (рис. 8). Затем с помощью осциллографа определялась амплитуда пришедшей волны (рис. 9). Далее эксперимент повторялся с двумя другими пластинками оргстекла. Нужно заметить, что емкость с водой в этом эксперименте обеспечивала постоянство прижима и площади соприкосновения датчиков с моделью при смене исследуемых объектов.



Рис. 8. Измерение поглощения в оргстекле



Рис. 9. Осциллограмма пришедшей волны

Теперь можно определить коэффициент поглощения в оргстекле, исходя из того, что амплитуда волны, приходящей на приемник, равна [Ермолов и др., 2004]:

$$A = A_0 e^{-\alpha r}$$

где A – амплитуда в точке измерения, r – расстояние, проходимое волной, A_0 – коэффициент, равный произведению амплитуды волны, прошедшей расстояние r без учета затухания, и коэффициентов прохождения на границах сред, α – сумма коэффициентов поглощения в воде (α_0) и оргстекле. Отсюда, зная толщины образцов, амплитуды A_1 и A_2 в двух экспериментах можно найти α :

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{A1}{A2}\right)}{\Delta l} + \alpha_0$$

где Δ/ – разница толщин двух образцов. Нами были проведены измерения амплитуды прошедшего сигнала для трех пластинок разной толщины. Стоит отметить, что значение амплитуды *A* определялось по максимуму первого пика пришедшей волны. Затем был посчитан коэффициент отражения, который получился равным 23.4 ± 0.1 Нп/м. Во многих твердых телах при не очень высоких частотах коэффициент поглощения изменяется пропорционально первой степени частоты, поэтому зачастую в таблицах приводят значение отношения этих величин, которое не зависит от частоты и пропорционально добротности материала [Bloomfield et al., 2000; Ермолов и др., 2004]:

$$Q^{-1} \sim \frac{a}{f}.$$

Из данных, приведенных в [Ермолов и др., 2004], следует, что значение данного отношения лежит в диапазоне 8–12·10⁵ с/м. По результатам проведенного эксперимента было получено значение 11.7·10⁵ с/м, что укладывается в диапазон табличных значений.

Таким образом, вышеописанная методика измерения коэффициента поглощения может быть применена для исследования и других материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных измерений были получены акустические параметры для множества образцов. Акустическая жесткость исследованных материалов лежит в диапазоне от 1.6 до 16.5. Для пород, приведенных в табл. 6, этот параметр колеблется от 2.3 до 23.6. Следует отметить, что в табл. 6 приведены средние показатели для оценки диапазона акустической жесткости и сопоставления с нашими измерениями.

Также была отработана методика измерения акустического поглощения в оргстекле. Полученные значения соответствуют табличным, что дает основания утверждать, что данная методика может быть в дальнейшем применима для измерения поглощения и в других образцах.

Выражаем благодарность рецензенту Д.А. Попову, замечания и комментарии которого способствовали существенному улучшению статьи. Некоторые из его предложений будут реализованы при выполнении дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

ЛИТЕРАТУРА

Аверко Е.М., Максимов Л.А. Моделирование сейсмических полей и способов их обработки. – Новосибирск: Наука, 1984. – 86 с.

Богословский В.А., Горбачев Ю.И., Жигалин А.Д., Калинин А.В., Попов М.Г., Пушкарев П.Ю., Модин И.Н., Никитин А.А., Никитин Ан.А., Степанов П.Ю., Хмелевский В.К. Геофизика. – М.: КДУ, Добросвет, 2018. – 320 с.

Бродовой В.В, Глебовский Ю.С., Дмитриев В.И., Дортман Н.Б., Запорожец В.М., Мудрецова Е.А., Никитин А.А., Никитский А.Е., Номоконов В.П., Добрынина Н.П., Першина Е.Г. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1988. – 455 с.

Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии. – М.: Эхо, 2004. – 109 с.

Ивакин Б.Н. Методы моделирования сейсмических волновых явлений. – М.: Наука, 1969. – 287 с.

Попов Д.А., Мусин М.В., Половков В.В. Использование физического моделирования при изучении строения консолидированной земной коры сейсмическими методами: Материалы конференции «Геофизические методы исследования Земли и ее недр». – Санкт-Петербург, 2016. – С. 102–111.

Brown R.J., Lawton D.C., Cheadle S.P. Scaled physical modelling of anisotropic wave propagation: multioffset profiles over an orthorhombic medium // Geophysical Journal International. – 1991. – Vol. 107 (3). – P. 693–702, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01428.x.

Bloomfield P.E., Lo W.J., Lewin P.A. Experimental study of the acoustical properties of polymers utilized to construct PVDF ultrasonic transducers and the acousto-electric properties of PVDF and P (VDF/TrFE) films // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control. – 2000. – Vol. 47. – P. 1397–1405, doi: 10.1109/58.883528.

Chang C.-H., Gardner G.H.F. Effects of vertically aligned subsurface fractures on seismic reflections: A physical model study // Geophysics. – 1997. – Vol. 62 (1). – P. 245–252, doi: 10.1190/1.1444124.

Chang C.-H., Gardner G.H., McDonald J.A. A physical model of shear-wave propagation in transversely isotropic solid // Geophysics. – 1994. – Vol. 59 (3). – P. 484–487, doi: 10.1190/1.1443610.

Dulaijan K.A., Margrave G.F., Wong J. 3D seismic physical modeling for azimuthal variations of *P*-wave velocity // CREWES Research Report. – 2015. – Vol. 27. – 13 p. **Evans B., McDonald J., French W.** Seismic physical modelling of reservoirs, its past, present and future // ASEG Extended Abstracts. – 2007. – Vol. 2007 (1). – P. 1–6, doi: 10.1071/ASEG2007ab037.

Ebrom D.A., McDonald J.A. Seismic physical modeling. Geophysics reprint series. No.15. – Society of Exploration Geophysicists, South Yale, 1994. – 519 p.

French W.S. Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (3). – P. 265–277, doi: 10.1190/1.1440426.

Hilterman F.J. Three-dimensional seismic modeling // Geophysics. – 1970. – Vol. 35 (6). – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.

Terada T., Tsuboi C. Experimental studies on elastic waves. Part 1 // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.

Sherlock D., McKenna J., Evans B. Time-lapse 3-D seismic physical modelling // Exploration Geophysics. – 2000. – Vol. 31 (1–2). – P. 310–314, doi: 10.1071/EG00310.

Wang T., Yuan S., Shi P., Shuai D., Luo C., Wang S. AVAZ inversion for fracture weakness based on threeterm Rüger equation // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 162. – P. 184–193, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.12.013.

Wong J., Hall K., Gallant E., Maier R., Bertram M., Lawton D. Seismic physical modeling at the University of Calgary // SEG Technical Program/ Expanded Abstracts. – 2009. – P. 2642–2646, doi: 10.1190/1.3255395.

REFERENCES

Averko E.M., Maksimov L.A. Modeling of seismic fields and methods of their processing [in Russian]. – Nauka, Novosibirsk, 1984. – 86 p.

Bloomfield P.E., Lo W.J., Lewin P.A. Experimental study of the acoustical properties of polymers utilized to construct PVDF ultrasonic transducers and the acousto-electric properties of PVDF and P (VDF/TrFE) films // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control. – 2000. – Vol. 47. – P. 1397–1405, doi: 10.1109/58.883528.

Bogoslovskii V.A., Gorbachev Yu.I., Zhigalin A.D., Kalinin A.V., Popov M.G., Pushkarev P.Yu., Modin I.N., Nikitin A.A., Nikitin An.A., Stepanov P.Yu., Hmelevskij V.K. Geophysics [in Russian]. – KDU, Dobrosvet, Moscow, 2018. – 320 p.

Brodovoi V.V., Glebovsky Yu.S., Dmitriev V.I., Dortman N.B., Zaporozhets V.M., Mudretsova E.A., Nikitin A.A., Nikitsky A.E., Nomokonov V.P., Dobrynina N.P., Pershina E.G. Physical properties of rocks and minerals. Handbook of geophysics [in Russian]. – Nedra, Moscow, 1988. – 455 p.

Brown R.J., Lawton D.C., Cheadle S.P. Scaled physical modelling of anisotropic wave propagation: multioffset profiles over an orthorhombic medium // Geophysical Journal International. – 1991. – Vol. 107 (3). – P. 693–702, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01428.x.

Chang C.-H., Gardner G.H.F. Effects of vertically aligned subsurface fractures on seismic reflections: A physical model study // Geophysics. – 1997. – Vol. 62 (1). – P. 245–252, doi: 10.1190/1.1444124.

Chang C.-H., Gardner G.H., McDonald J.A. A physical model of shear-wave propagation in transversely isotropic solid // Geophysics. – 1994. – Vol. 59 (3). – P. 484–487, doi: 10.1190/1.1443610.

Dulaijan K.A., Margrave G.F., Wong J. 3D seismic physical modeling for azimuthal variations of *P*-wave velocity // CREWES Research Report. – 2015. – Vol. 27. – 13 p.

Ebrom D.A., McDonald J.A. Seismic physical modeling. Geophysics reprint series. No. 15. – Society of Exploration Geophysicists, South Yale, 1994. – 519 p.

Ermolov I.N., Vopilkin A.C., Badaluan V.G. Calculations in Ultrasonic Testing. – Echo, Moscow, 2004. – 109 p. Evans B., McDonald J., French W. Seismic physical modelling of reservoirs, its past, present and future // ASEG Extended Abstracts. – 2007. – Vol. 2007 (1). – P. 1–6, doi: 10.1071/ASEG2007ab037.

French W.S. Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles // Geophysics. – 1974. – Vol. 39 (3). – P. 265–277, doi: 10.1190/1.1440426.

Hilterman F.J. Three-dimensional seismic modeling // Geophysics. – 1970. – Vol. 35 (6). – P. 1020–1037, doi: 10.1190/1.1440140.

Ivakin B.N. Methods for modeling seismic wave phenomena [in Russian]. - Nauka, Moscow, 1969. - 287 p.

Popov D.A., Musin M.V., Polovkov V.V. Seismic physical modeling for consolidated crust studies // Geophysical methods of survey the Earth and its subsoil. – St. Petersburg, 2016. – P. 102–111.

Sherlock D., McKenna J., Evans B. Time-lapse 3-D seismic physical modelling // Exploration Geophysics. – 2000. – Vol. 31 (1–2). – P. 310–314, doi: 10.1071/EG00310.

Terada T., Tsuboi C. Experimental studies on elastic waves. Part 1 // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1927. – Vol. 3. – P. 55–65.

Wang T., Yuan S., Shi P., Shuai D., Luo C., Wang S. AVAZ inversion for fracture weakness based on threeterm Rüger equation // Journal of Applied Geophysics. – 2018. – Vol. 162. – P. 184–193, doi: 10.1016/j.jappgeo.2018.12.013.

Wong J., Hall K., Gallant E., Maier R., Bertram M., Lawton D. Seismic physical modeling at the University of Calgary // SEG Technical Program/ Expanded Abstracts. – 2009. – P. 2642–2646, doi: 10.1190/1.3255395.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЗАДОЕВ Алексей Юрьевич – инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: физическое моделирование.

ПЕТРОЧЕНКО Татьяна Анатольевна – аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основные научные интересы: обработка сейсмической информации.

ОРЛОВ Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: создание физических моделей и развитие методов анализа волновых полей в сложных моделях сред.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсморазведка, геотермия.

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка методов и технологий обработки и интерпретации сейсмических данных, решение обратных задач геофизики.