

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В СРЕДАХ
С РАЗНЫМ СООТНОШЕНИЕМ СТОРОН И ОРИЕНТАЦИЕЙ ПУСТОТ

В.В. Халимендик

*Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
НИИ «Институт геологии», ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,
e-mail: valeriikhalimendik@gmail.com*

Представлены результаты акустического 2D моделирования для установления влияния формы и ориентации пор на акустические свойства породы. Для реализации процедуры моделирования в программном пакете «Tesseral» пустоты размером 0,1 мм занимали одну ячейку грида 1×1 м, т. е. размерность модели увеличена в 10^4 раз. Во столько же раз уменьшена и частота звукового сигнала. Общий размер модели для моделирования соответствует размерам акустического зонда 2×1 м. Описаны результаты расчета для нескольких моделей песчаника с однородным составом пустот, заполненных водой. Одна изотропная модель заполнена дисками диаметром 1 мм, две другие — анизотропные, трещины диаметром 1 мм и длиной 10 мм ориентированы соответственно вдоль и поперек движения волны. Остальные анизотропные модели заполнены разными дисками в зависимости от соотношения осей эллипсоида и ориентации в пространстве. Показано, что разные форма и ориентация пустот в матрице геологической среды по-разному влияют на ее акустические свойства. Особенно ощутима разница между пустотами круглой формы и вытянутыми в направлении движения волны. При увеличении длины трещины, вытянутой вдоль направления движения волны, скорость прохождения акустических волн значительно снижается. В случае если трещины вытянуты поперек направления движения волны, скорость прохождения акустических волн практически не изменяется, колеблясь в диапазоне ± 100 м/с.

Ключевые слова: акустические свойства, типы пор, соотношение сторон пустот, пористость породы, звуковой каротаж, симуляция звуковой волны, эластичное моделирование.

Введение. Исследование емкостных свойств комплексных коллекторов нефти и газа, а также количественная оценка структуры пустотного пространства пород нефтегазовых комплексов — одно из приоритетных направлений современной геофизики. На сегодня в производственной геофизике данная задача решается методами микрокомпьютерной томографии (МКТ) и ядерно-магнитного каротажа (ЯМК). Эти методы позволяют получить 3D изображение внутреннего строения горных пород, в том числе порового пространства.

Данные, полученные с помощью средств обработки изображений с высоким разрешением, предоставляют подробную информацию о структуре породы, однако существуют некоторые ограничения для широкого применения указанных методик. Одно из них — дороговизна исследований, другое — сложность численных вычислений при 3D моделировании, большие затраты времени и требование огромных вычислительных мощностей компьютеров.

В качестве альтернативных разрабатываются методы, основанные на изучении упругих свойств с помощью акустических методов (особенно ультра-акустического каротажа) в комплексе с плотностными каротажными методами. При этом трудности изучения связаны со сложной структурой пустотного пространства и отсутствием однозначной методики определения распределения пустот различных видов по геофизическим данным.

Цель работы — исследование влияния формы и ориентации пор на акустические свойства породы по результатам акустического 2D моделирования полноволновым методом в программном пакете «Tesseral».

Теория. В результате многолетних исследований в области акустики разработано несколько направлений для изучения влияния тонкослоистых объектов на акустические свойства геологической среды. Одно из направлений опирается на теорию эффективной среды. В работе [6] введена формулировка методики в соответствии с длинноволновой теорией рассеяния первого порядка, которая оценивает эффективные упругие параметры среды, содержащей различные типы пор. В теории дифференциальной эффективной среды [2] модели строятся путем постепенного добавления включений с различными параметрами к матрице. На основе математической модели дифференциальной эффективной среды в работе [3] вместо тонкослоистых объектов использованы мелкие формы объектов в виде сфероида вращения с разным соотношением сторон. Было изучено влияние разных видов пустотных включений на акустические свойства среды и сделан вывод о том, что плоские и более вытянутые пустоты значительно влияют на акустические свойства среды, чем сфероидальные пустоты [3].

В качестве эксперимента были построены реальные модели горных пород с известной поро-

вой структурой для изучения влияния последней на скорость прохождения акустических волн путем лабораторных измерений.

С учетом результатов одного из таких исследований [8] был предложен метод изучения геологической среды, в котором использовано уравнение статистически усредненного закона Гука: для любой микроточки

$$\langle \sigma_{mn}(\mathbf{x}, t) \rangle = \Lambda_{mnkq}^{(1)}(\mathbf{x}) \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R c^{(pr)}(\mathbf{x}) \langle \varepsilon_{kq}^{(pr)}(\mathbf{x}, t) \rangle + \Lambda_{mnkq}^{(0)}(\mathbf{x}) c^{(0)}(\mathbf{x}) \langle \varepsilon_{kq}^{(0)}(\mathbf{x}, t) \rangle,$$

где (\mathbf{x}, t) — точка в пространстве—времени; $\langle \sigma_{mn} \rangle$ — тензор напряжений, $\Lambda_{mnkq}^{(1)}$ — тензор упругих постоянных включений; $\Lambda_{mnkq}^{(0)}$ — тензор упругих постоянных матрицы; $c^{(pr)}$ — концентрация включений, эллиптические поры с соотношением сторон ap и главной осью, ориентированной в направлении r ; $c^{(0)}$ — концентрация матрицы; $\langle \varepsilon_{kq}^{(pr)} \rangle$ и $\langle \varepsilon_{kq}^{(0)} \rangle$ — условные математические ожидания тензора деформаций соответственно включений и матрицы.

Рассчитывают усредненные модули объемного сжатия K и сдвига G и находят акустические свойства модели геологической среды:

$$V_D = \sqrt{(K + G \cdot 4/3)/\rho}; \quad V_S = \sqrt{G/\rho},$$

где V_P, V_S — скорости прохождения продольных и поперечных скорости волн соответственно; ρ — плотность матрицы геологической среды [9].

В работе [4] рассмотрена математическая модель [8]: методом поочередного перебора концентраций разных форм пустот продемонстрировано их влияние на акустические свойства разных типов пород, имеющих разную пористость и содержащих разный тип флюида. Установлено большее влияние более вытянутой и плоской формы пустот, чем сферической, и существенное снижение скорости прохождения акустических волн через среду [4].

Другим возможным направлением является метод полноволнового моделирования, основу которого составляет система гиперболических дифференциальных уравнений в частных производных. Для ее решения использован численный метод конечных разностей — подстановка закона упругости Гука в формулу второго закона Ньютона [1]:

$$\rho(\mathbf{x}) \mathbf{s}''(\mathbf{x}, t) = \nabla \cdot \Sigma(\mathbf{x}, t) + \mathbf{f}(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$

где (\mathbf{x}, t) — точка в пространстве—времени; ρ — плотность породы; \mathbf{s}'' — вектор смещений; Σ — тензор напряжений; \mathbf{f} — внешняя сила (сигнал); оператор ∇ обозначает дивергенцию в пространстве, а штрихи — производную по времени; Σ — тензор напряжений — квадратная симметричная матрица $\sigma_{km} = \sigma_{mk}$, причем σ_{kk} — напряжение сжатия/растяже-

ния вдоль оси k , а если $k \neq m$, то σ_{km} — напряжение сдвига в плоскости km ; \mathbf{f} — внешняя сила в задачах моделирования сейсморазведки, прилагается в точку источника, ее можно выразить через δ -функцию Кронекера: $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = \delta(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|) \mathbf{F}(t)$.

Конкретизация системы (1) зависит от характера физической модели. В эластическом изотропном приближении

$$\Sigma(\mathbf{x}, t) = \lambda(\mathbf{x})(\nabla \cdot \mathbf{s}(\mathbf{x}, t)) \mathbf{I} + \mu(\mathbf{x}) \left(\nabla \mathbf{s}(\mathbf{x}, t) + (\nabla \mathbf{s}(\mathbf{x}, t))^T \right),$$

где \mathbf{I} — единичная матрица: $I_{km} = \delta(k - m)$; модель среды представляют коэффициенты Ламе $\mu(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) V_S^2(\mathbf{x})$ и $\lambda(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) V_P^2(\mathbf{x}) - 2\mu(\mathbf{x})$; оператор ∇ обозначает градиент в пространстве, а \mathbf{M}^T — транспонированную матрицу \mathbf{M} : $M_{km}^T = M_{mk}$.

В общем случае тензор напряжений анизотропной формы Σ выражается из тензора жесткости \mathbf{L} :

$$\begin{aligned} \sigma_{mn}(\mathbf{x}, t) &= \sum_k \sum_q \Lambda_{mnkq}(\mathbf{x}) \frac{\partial s_k}{\partial x_q}(\mathbf{x}, t) = \\ &= \sum_k \sum_q \Lambda_{mnkq}(\mathbf{x}) \varepsilon_{kq}(\mathbf{x}, t), \end{aligned}$$

где ε — тензор деформации.

Статья [9] — одна из первых работ, в которой описано применение конечноразностного грида для модели среды с включениями типа трещин вместо тонкослоистых объектов.

В публикациях [7, 10] описаны и некоторые особенности использования полноволнового моделирования в программном пакете «Tesseral». Например, для вычисления на вход подается некий грид в формате sgu, ячейки которого разделены на два класса: среду и тонкослоистые объекты. Согласно анализу затрат времени и вычислительных ресурсов для 2D, 2,5D и 3D моделирования, первые два метода значительно экономнее третьего.

Метод. Для проведения исследования были проведены 2D грид-модели. Размер грида определяли размерами акустического зонда, для данного исследования его высота составила 2 м (расстояние между источником и приемниками), ширина — 1 м (глубина проникновения акустической волны). Возможные размеры пор/трещин варьируются в следующих диапазонах: диаметр сечения 0,0002—2 мм, длина трещин 0,1—10 мм. Исходя из этого было принято, что для достижения приближения модели к реальной среде необходимо установить дискрет грида 0,1 мм или 10—2 м, так как программный пакет «Tesseral» рассчитан на сейсмическое моделирование, т. е. большие площади исследования. Для имитации акустического моделирования необходимо отмасштабировать размерность грида в метры (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Параметры моделирования
Table 1. The simulation parameter

Тип модели	Высота (h), м	Глубина проникновения волны (w), м	Частота акустического сигнала (ν), Гц	Диаметр пор, м	
				D_{\min}	D_{\max}
Масштабированная	20000	10000	2,5	1	1
Реальная	2	1	$25 \cdot 10^3$	10^{-4}	10^{-4}

Методика проведения работ для выполнения акустического 2D моделирования состоит из двух основных этапов [5].

На первом этапе с помощью авторской программы рассчитывается теоретическая модель геологической среды, состоящей из матрицы и пустот, аппроксимируемых эллипсом. На вход программа принимает следующие параметры: продольную и поперечную скорости прохождения акустических волн для матрицы и пор, плотность пор, пористость среды. Настраиваются размер геологической среды, форма, размер и ориентация пор. Программа генерирует грид, заполненный входными параметрами матрицы среды. Пропорционально пористости среды грид заполнен параметрами пустот — эллипсами,

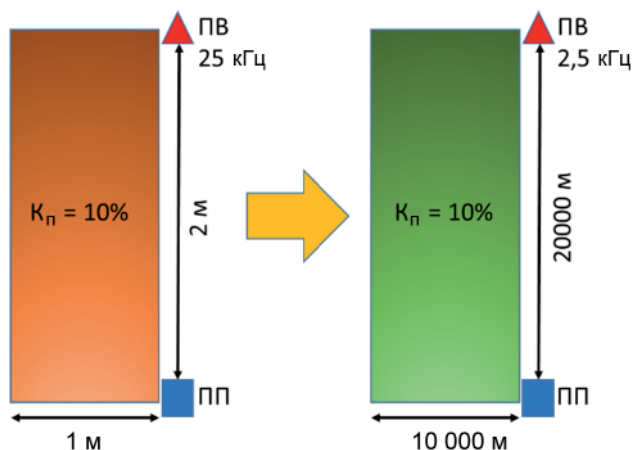


Рис. 1. Иллюстрация масштабирования размера изучаемой геологической среды

Fig. 1. Illustration of scaling the size of the studied geological environment

рандомно распределенными в заданных диапазонах. На выходе программа возвращает SGY-файл.

На втором этапе рассчитывается синтетическая сейсмограмма по заданной геологической модели, в данном случае — с помощью модуля «Mod2D» программного продукта «Tesserall», методом эластического изотропного приближения, так как можно рассчитать V_p , V_s . Для расчета использована схема, имитирующая акустический зонд с одним источником и двумя приемниками на расстоянии 1 и 2 м. Частота сигнала составила 25 кГц, но для сохранения размерности полученных параметров скорость также была отмасштабирована (табл. 1). Расчет выполнен на базе ЦП Intel Xeon E5-2600 с частотой 2,6 ГГц, 16 ядер (32 в режиме HyperThreading), на оборудовании кластерного комплекса СКИТ-4 Института кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины.

Результат. Ниже представлены результаты расчета семи моделей с однородным составом пустот, заполненных водой, и матричным скелетом среды — песчаником. Размер, форма, ориентация пустот и другие физические характеристики моделируемых геологических сред приведены в табл. 2, 3 и на рис. 2.

Следует отметить, что в моделях **a**, **d**—**g** площадь каждого отдельно взятого пустотного включения — константа, равная $10^{-6} \pi \text{ м}^2$.

Результаты моделирования в виде сейсмограмм представлены на рис. 3 и в табл. 4.

Ощутимая разница прослеживается между пустотами круглой формы (модель **a**) и вытянутой в направлении движения волны (модель **c**). Геометрические характеристики существенно снижают акустические свойства моделируемой среды. Этот

Таблица 2. Геометрические характеристики пустот геологических моделей
Table 2. Geometric characteristics of geological model voids

ID модели	Диаметр сечения, D , м	Соотношение сторон эллипса — формат (b/a)	Угол наклона, α , град
a	10^{-3}	1	0
b	10^{-3}	0,1	90
c	10^{-3}	0,1	0
d	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0,35	90
e	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0,35	0
f	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,16	90
g	$0,4 \cdot 10^{-3}$	0,16	0

Таблица 3. Физические характеристики матричного скелета и пустот геологических моделей*
Table 3. Physical characteristics of matrix skeleton and voids of geological models

Модель	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , кг/м ³
Матрица	5700	3500	2650
Пустоты	1300	0	1100

* Пористость (ϕ) 10 %

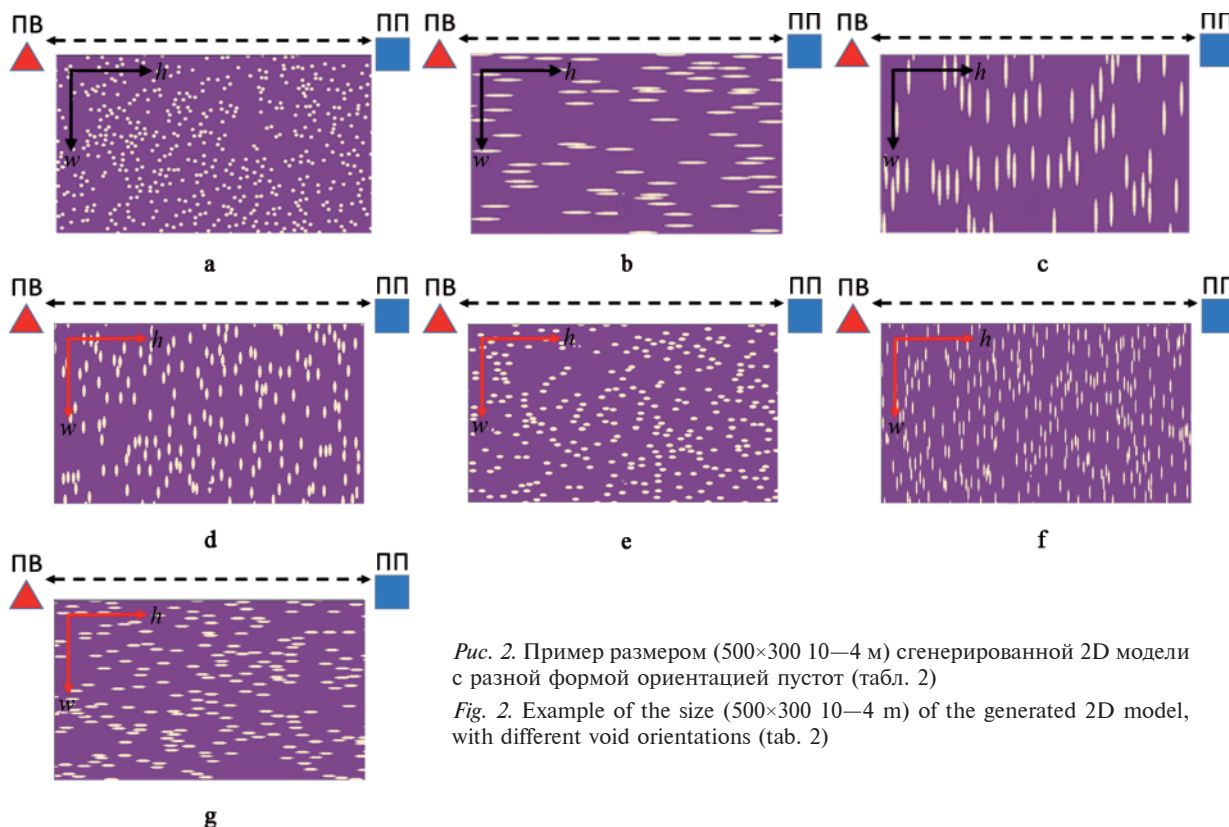


Рис. 2. Пример размером (500×300 10—4 м) сгенерированной 2D модели с разной формой ориентацией пустот (табл. 2)

Fig. 2. Example of the size (500×300 10—4 m) of the generated 2D model, with different void orientations (tab. 2)

Таблица 4. Численные результаты 2D моделирования

Table 4. Numerical results of 2D modeling

ID модели	V_p , м/с	V_s , м/с	ρ , кг/м ³	G , ГПа	M , ГПа	μ	E , ГПа	KBR	K , ГПа	χ
a	5208	2652	2495	17,55	67,68	0,32	46,51	0,48	44,27	2,07
b	5602	2298	2495	13,18	78,30	0,39	36,88	0,66	60,72	1,51
c	3257	2105	2495	11,05	26,47	0,14	25,24	0,16	11,72	6,07
d	4495	2600	2495	16,87	50,39	0,24	42,13	0,33	27,89	3,02
e	5479	2699	2495	18,17	74,91	0,33	48,70	0,51	50,67	1,94
f	3759	2325	2495	13,49	36,11	0,19	32,11	0,23	17,27	4,26
g	5556	2439	2495	14,84	77,01	0,38	40,98	0,61	57,21	1,62

Примечание: M — модуль продольной волны; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга; KBR — коэффициент бокового распора; χ — коэффициент сжимаемости.

эффект может быть объяснен тем, что волна чаще взаимодействует с объектами, вытянутыми вдоль ее движения, чем с объектами круглой формы. Об-

ратная тенденция прослеживается между пустотами круглой формы (модель a) и вытянутыми поперек направления волны (модель b). Такая геометрия

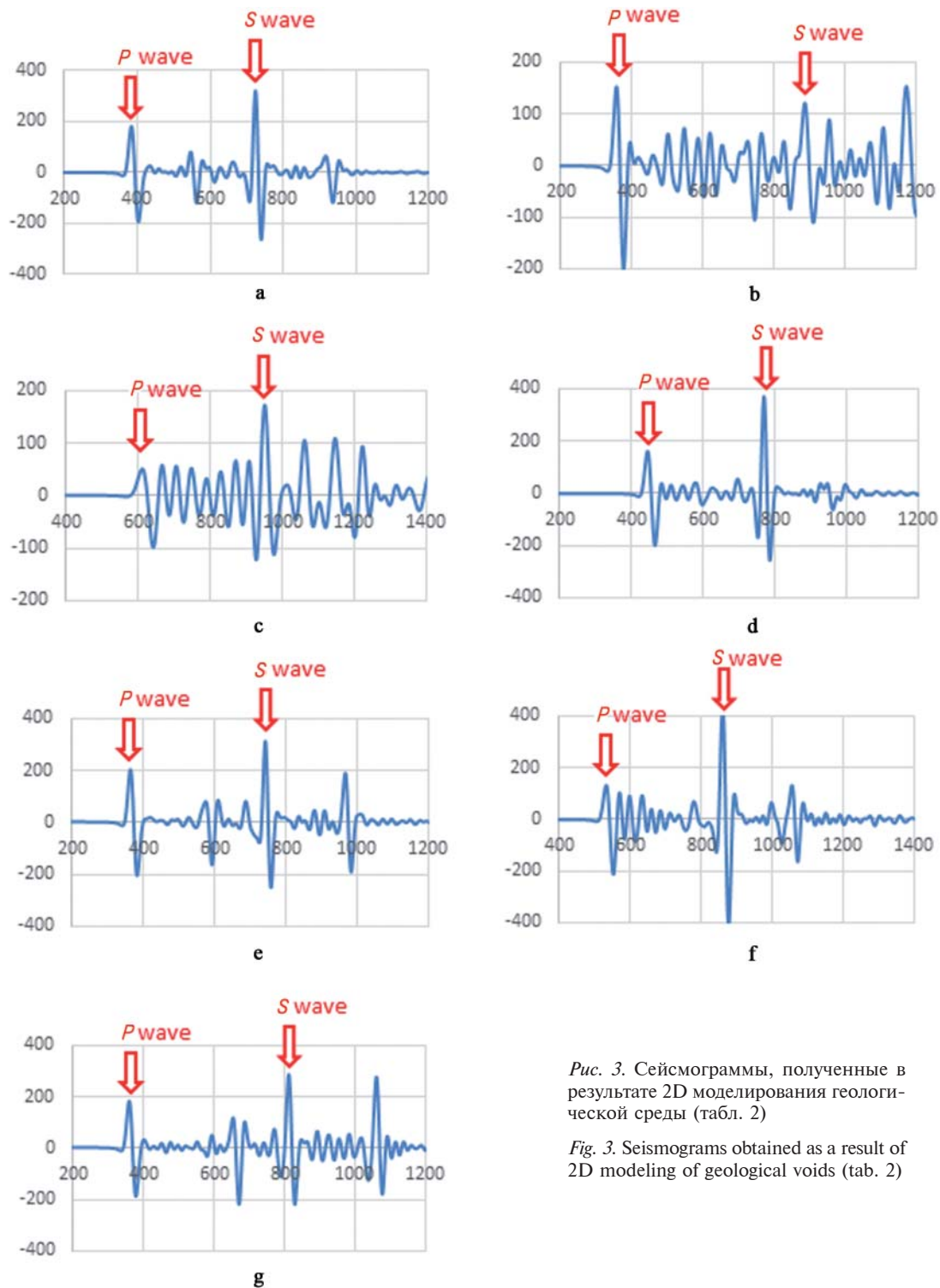


Рис. 3. Сейсмограммы, полученные в результате 2D моделирования геологической среды (табл. 2)

Fig. 3. Seismograms obtained as a result of 2D modeling of geological voids (tab. 2)

улучшила акустические свойства модели, поскольку при одинаковой пористости трещин меньше, чем круглых форм, что увеличивает шанс составляющих (табл. 4).

При увеличении длины трещины, вытянутой вдоль направления движения волны, скорость прохождения акустических волн снижается (модели по убыванию: d—f—c). В случае если трещины вытянуты поперек направления движения волны, скорость прохождения акустических волн практи-

чески не изменяется и составляет ± 100 м/с (модели b—e—g). Это объясняется небольшим диаметром сечения трещин, что не создает препятствия для проходящей волны (табл. 4).

Вывод. Впервые применен метод численного решения задачи полноволнового моделирования методом конечных разностей для исследования влияния разных типов пустот и их ориентации в пространстве с помощью модели, приближенной к реальной скважинной среде.

Результат 2D моделювання демонструє, що різні форма і орієнтація порожнин в матриці геологічної середовища по-різному впливають на її акустичні властивості.

Недостатком розглянутого методу моделювання є час, витрачене на розрахунок однієї моделі, — близько 50–65 ч, що пов'язано з великою деталізацією (маленьким кроком ґрида). Зменшити час, витрачене на проведення розрахунку, можна двома способами: використати більш потужні обчислювальні ресурси, такі як відеокарта або процесор, або зменшити дискретизацію ґрида.

Благодарность. Сотрудникам отдела 145 Института кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины за предоставленный доступ к кластерному комплексу СКИТ-4 для проведения вычислений.

Список библиографических ссылок

1. Alterman Z., Karal F.C. Propagation of elastic waves in layered media by finite-difference methods. *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1968. N 58. P. 367–398. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0049-3>
2. Berryman J.G. Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1992. Vol. 91, N 2. P. 551–571. <https://DOI.org/10.1121/1.402518>
3. Karimpouli S., Tahmasebi P., Saenger E.H. Estimating 3D elastic moduli of rock from 2D thin-section images using differential effective medium theory. *Geophysics*. 2018. Vol. 83, N 4. MR211-MR219. <https://DOI.org/10.1190/geo2017-0504.1>
4. Khalimendik V., Virshylo I. Velocities of elastic waves modeling for complex reservoir rocks. In 16th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701859>
5. Khalimendik V., Virshylo I. Acoustic 2D modeling to determine the influence of aspect ratio and pore orientation on the acoustic properties of the rock. In 17th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801803>
6. Kuster G.T., Toksoz M.N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. Part I. Theoretical formulations. *Geophysics*. 1974. Vol. 39, N 5. P. 587–606. <https://DOI.org/10.1190/1.1440450>
7. Lavreniuk S., Roganov Y., Tulchinsky V., Kolomyiets O. Synergy of 2.5 D approach and grid technology for synthesis of realistic 3D/3C seismograms in anisotropic media. In 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. 2011. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20149522>
8. Продайвода Г.Т., Маслов Б.П., Король В.В. Определение спектра распределения параметров структуры трещинно-порового пространства горных пород по данным инверсии зависимости скорости упругих волн от давления. *Геофизический журнал*. 1995. Т. 17, № 5. С. 75–80.
9. Saenger E.H., Shapiro S. A. Effective velocities in fractured media: a numerical study using the rotated staggered finite-difference grid. *Geophysical Prospecting*. 2002. Vol. 50, N 2. P. 183–194. <https://DOI.org/10.1046/j.1365-2478.2002.00309.x>
10. Tulchinsky V.G., Iushchenko R.A., Roganov Y. V. Acceleration of 2.5 D Elastic Anisotropic Modelling. In 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC. 2012. <https://DOI.org/10.3997/2214-4609.20148129>

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ В СЕРЕДОВИЩАХ З РІЗНИМ СПІВВІДНОШЕННЯМ СТОРІН І ОРІЄНТАЦІЄЮ ПОРОЖНИН

В.В. Халимендік

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

ІНІ «Інститут геології», вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна, e-mail: valera-h92@yandex.ru

Наведено результати акустичного 2D моделювання для встановлення впливу форми і орієнтації порожнин на акустичні властивості породи. Для реалізації процедури моделювання в програмному пакеті «Tesseral» розмірність моделі була масштабована у такий спосіб, щоб порожнини розміром 0,1 мм займали одну клітинку ґриду 1×1 м, тобто збільшена у 10⁴ разів. У стільки разів була зменшена й частота звукового сигналу. Загальний розмір моделі для моделювання відповідає розмірам акустичного зонда 2×1 м. Описано результати розрахунку для декількох моделей пісковика з однорідним складом порожнин, заповнених водою. Одна модель ізотропна і заповнена дисками діаметром 1 мм, дві інші — анізотропні, тріщини діаметром 1 мм і завдовжки 10 мм орієнтовані відповідно уздовж і поперек руху хвилі. Інші моделі також анізотропні, заповнені різними варіаціями залежно від співвідношення осей еліпсоїда і орієнтації в просторі. Результат 2D моделювання демонструє, що різні форма і орієнтація порожнин в матриці геологічного середовища по-різному впливають на її акустичні властивості. Особливо відчутна різниця між порожнинами круглої форми і витягнутими у напрямку руху хвилі. За збільшення довжини тріщини, якщо вона витягнута уздовж напрямку руху хвилі, швидкість поширення акустичних хвиль значно знижується. Якщо тріщини витягнуті поперек напрямку руху хвилі, швидкість поширення акустичних хвиль практично не змінюється, коливаючись у діапазоні ±100 м/с.

Ключові слова: акустичні властивості, різні типи порожнин, співвідношення сторін порожнин, пористість породи, звуковий каротаж, симуляція звукової хвилі, еластичне моделювання.

SIMULATION OF WAVE FIELD IN MEDIA WITH DIFFERENT ASPECT RATIO AND ORIENTATION OF VOIDS

V.V. Khalimendik

Kyiv National University of Taras Shevchenko, Institute of Geology, 90 Vasylykivska str.,
Kyiv, 03022, Ukraine, e-mail: valeriikhlimendik@gmail.com

Purpose. This paper describes a study of the results of acoustic 2D modeling to determine the influence of the shape and orientation of the pores on the acoustic properties of the rock. The aim of this work is to study the influence of the shape and orientation of pores on the acoustic properties of the rock, according to the results of 2D acoustic modeling by full-wave method in the software package «Tesseral».

Methodology. For implement the simulation procedure in the software package «Tesseral», the model dimension was scaled so that the voids of 0,1 mm occupied one cell of the 1×1 m grid, that is, increased by 10^4 times. The frequency of the acoustic signal was reduced by the same number of times. The total size of the model corresponds to the size of the acoustic probe — 2×1 m. The calculation results for several models of Sandstone with a homogeneous composition of voids filled with water are presented. One model is isotropic and filled by disks with a diameter of 1 mm, the other two anisotropic — cracks with a diameter of 1 mm and a length of 10 mm are oriented along and across the wave motion. The rest, also anisotropic, filled with different variations which depending on the ratio of the axes of the ellipsoid and the orientation in space.

Findings. The result of 2D modeling shows that different not only the shape but also the orientation of voids in the matrix of the geological environment have different effects on its acoustic properties. Especially noticeable is the difference between the voids with round shape and elongated in the direction of the wave.

With increasing crack length, if it is stretched along the direction of the wave, the velocity of acoustic waves is significantly reduced. In cases where the cracks are stretched across the direction of the wave, the velocity of acoustic waves practically does not change, varies in the range of ± 100 m/s.

Implications. For the first time, the method of numerical solution of the problem of full wave modeling by the finite difference method was applied to study the influence of different types of voids and their orientation in space, in a model close to the real borehole environment.

The disadvantage of the above modeling method is the time spent on the calculation of one model — about 50–65 hours. This is due to the great detail (small grid step). There are two ways to reduce the time spent on the calculation: use more powerful computing resources such as a graphics card or processor, or reduce the discretization of the grid.

Keywords: acoustic properties, different types of pores, pore aspect ratio, rock porosity, sonic well log, sonic wave simulation, elastic modeling.

References

1. Alterman Z., Karal F.C. Propagation of elastic waves in layered media by finite-difference methods. *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1968. N 58. P. 367–398. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0049-3>
2. Berryman J.G. Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity. *The Journal of the Acoustical Society of America.* 1992. Vol. 91, N 2. P. 551–571. <https://DOI.org/10.1121/1.402518>
3. Karimpouli S., Tahmasebi P., Saenger E.H. Estimating 3D elastic moduli of rock from 2D thin-section images using differential effective medium theory. *Geophysics.* 2018. Vol. 83, N 4. MR211-MR219. <https://DOI.org/10.1190/geo2017-0504.1>
4. Khalimendik V., Virshylo I. Velocities of elastic waves modeling for complex reservoir rocks. In 16th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701859>
5. Khalimendik V., Virshylo I. Acoustic 2D modeling to determine the influence of aspect ratio and pore orientation on the acoustic properties of the rock. In 17th International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801803>
6. Kuster G.T., Toksuz M.N. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. Part I. Theoretical formulations. *Geophysics.* 1974. Vol. 39, N 5. P. 587–606. <https://DOI.org/10.1190/1.1440450>
7. Lavreniuk S., Roganov Y., Tulchinsky V., Kolomyiets O. Synergy of 2.5 D approach and grid technology for synthesis of realistic 3D/3C seismograms in anisotropic media. In 73rd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. 2011. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20149522>
8. Prodayvoda, G.T., Maslov, B.P., & Korol, V.V., 1995. The spectrum of fraction-porous space structure distribution of rocks from inversion results of elastic waves velocity versus pressure relation. *Geophysical Journal.* 1995. Vol. 17, N 5. P. 75–80 (in Russian).
9. Saenger E.H., Shapiro S. A. Effective velocities in fractured media: a numerical study using the rotated staggered finite-difference grid. *Geophysical Prospecting.* 2002. Vol. 50, N 2. P. 183–194. <https://DOI.org/10.1046/j.1365-2478.2002.00309.x>
10. Tulchinsky V.G., Iushchenko R.A., Roganov Y. V. Acceleration of 2.5 D Elastic Anisotropic Modelling. In 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC. 2012. <https://DOI.org/10.3997/2214-4609.20148129>

Received 26/02/19