

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ГЕОСРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ABCD-МАТРИЦ В ТЕНЕВОМ РЕЖИМЕ

А.И. Пашкин¹, В.А. Винников¹, Е.Б. Черепецкая¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: Alexandrill@ya.ru

Аннотация: Представлен краткий обзор и анализ методов, позволяющих определять внутреннюю структуру геосреды, таких как рентгеновская томография, акустическая микроскопия, лазерно-ультразвуковая структуроскопия. Обоснована актуальность разработки акустического метода исследования внутренней структуры геосреды в теневом режиме. Предложен метод, позволяющий решить указанную задачу с учетом эффектов дифракции, дисперсии фазовой скорости и частотно-зависимого затухания. Рассмотрен механизм распространения акустической волны через неоднородную среду. Приведены теоретические основы моделирования распространения акустического сигнала в таких средах. Проанализировано влияние на сигнал эффектов дифракции и представлен способ их учета при моделировании с помощью ABCD-матриц. Также выполнен анализ дисперсии фазовой скорости и частотно-зависимого затухания, их связи в соответствии с соотношениями Крамерса-Кронига, представлен способ учета этих характеристик при моделировании. На специально созданном слоистом образце с заложенной неоднородностью проведены эксперименты при помощи предложенного метода. Представлены восстановленный разрез образца и характеристики каждого из его слоев. Проведено сравнение полученных величин со значениями, полученными традиционными методами, благодаря чему подтверждена возможность использования разработанного метода для определения внутренней структуры геосреды в теневом режиме.

Ключевые слова: лазерная оптика, ультразвуковой контроль, слоистые среды, дефектоскопия, методы моделирования, ABCD-матрицы, структуроскопия, распространение акустического импульса.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90044.

Для цитирования: Пашкин А. И., Винников В. А., Черепецкая Е. Б. Метод определения внутренней структуры геосреды с использованием ABCD-матриц в теневом режиме // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 14–26. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_14.

Determination of internal structure of geomedium using ABCD matrices and shadow method

A.I. Pashkin¹, V.A. Vinnikov¹, E.B. Cherepetskaya¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: Alexandrill@ya.ru

Abstract: The article briefly reviews and analyzes the methods to determine internal structure of a geomedium, such as X-ray tomography, acoustic microscopy and laser ultrasonic structural imaging. The relevance of the acoustic shadowing of the internal structure of a geomedium is justified. The method to solve this task with regard to diffraction, phase-velocity dispersion and frequency-dependent attenuation is proposed. The mechanism of the acoustic wave propagation in a heterogeneous medium is examined. The theory of modeling of acoustic signal propagation in such media is described. It is analyzed how diffraction phenomena influence the signal, and the method of including them in modeling using ABCD matrices is presented. The analysis of the phase-velocity dispersion and frequency-dependent attenuation, as well as their connection with the Kramers–Kronig relations is performed, and the method to include these characteristics in modeling is described. A special layered specimen with embedded heterogeneity is manufactured for testing using the proposed method. The restored profile of the specimen is presented with characterization of each layer. The comparison of the results with the conventionally obtained data proves applicability of the developed method to determining internal structure of geomedia in the shadow mode.

Key words: laser optoacoustic method, ultrasonic control, layered media, nondestructive testing, modeling methods, ABCD matrices, structural imaging, acoustic pulse propagation.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 20-35-90044.

For citation: Pashkin A. I., Vinnikov V. A., Cherepetskaya E. B. Determination of internal structure of geomedium using ABCD matrices and shadow method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(8):14-26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_14.

Введение

Исследование внутренней структуры горных пород, особенно пород-коллекторов, является актуальной задачей. На сегодняшний день наиболее информативным методом для решения этой задачи является рентгеновская томография [1–6], которая позволяет определять многие характеристики порового пространства. Так, в работе [1] авторы при исследовании образцов терригенных пород-коллекторов выделяют такие преимущества томографического метода, как: возможность определения общей пористости с высокой точностью, получения формы порового пространства, оценки размеров и распределения пор по размерам. В работе [2] показано, что метод рентгеновской томографии применим как при исследовании образ-

цов малых размеров (с объемом менее 1 см^3), так и при исследовании полноразмерных кернов, при этом разрешение каждой конкретной установки определяется именно геометрическими параметрами образцов. Авторы [3–7] показывают, что метод позволяет оценивать пористость, трещиноватость, внутреннюю структуру образцов, приводят методики исследования диспергированных сред, и даже таких явлений как смачиваемость пор. Однако данный метод не дает информации о средах с сильными магнитными свойствами, а также о структурных компонентах с близкими значениями плотностей, требует совершенных алгоритмов обработки сигналов [7].

Исследовать внутреннюю структуру образцов горных пород также позволяют ультразвуковые методы, результаты

применения которых в свою очередь не подвержены воздействию магнитных полей, более чувствительны к структурным элементам с одинаковыми значениями плотностей, но с разными величинами скоростей упругих волн. Современные ультразвуковые методы исследования внутренней структуры образцов геоматериалов представлены ультразвуковой томографией [8–10], акустической микроскопией [11, 12], лазерно-ультразвуковой структуроскопией [13, 14]. В работе [8] для изучения процессов трещинообразования при одноосном нагружении образцов гранита с целью построения 2D изображения был реализован теневой режим с использованием 16 излучающих и 16 приемных пьезопреобразователей. Однако для выявления структурных особенностей материала помимо определения скоростей продольных волн оказалось необходимым провести моделирование на основе метода конечных элементов, что является достаточно трудоемкой задачей. Авторами [9, 10] использовался ультразвуковой эхо-режим и также численное моделирование, на основе которых удалось локализовать неоднородности размерами порядка 200 мкм на глубинах менее 1 мм. Лучшего разрешения добиться не удалось.

Для построения изображения внутренней структуры с разрешением порядка 100 мкм используется также акустическая микроскопия [11, 12]. Однако использование высокочастотных компонент ультразвукового поля позволяет исследовать структуры образцов толщиной менее 500 мкм.

Поэтому наиболее информативными являются лазерно-ультразвуковые методы, позволяющие проводить диагностику структурных особенностей образцов горных пород с разрешением порядка 200 мкм [13, 14]. Для этих целей используется режим эхоскопии. Однако глубина зондирования с целью построе-

ния изображения внутренней структуры геоматериала в этом случае составляет не более 3–5 мм, поскольку горные породы характеризуются сильным затуханием волн. Более того, разработанные на сегодняшний день алгоритмы построения внутренней структуры по рассеянному и отраженному сигналам на основе лазерно-ультразвуковой диагностики не учитывают эффекты дифракции, частотно-зависимое затухание и дисперсию фазовой скорости.

Следовательно, для увеличения глубины зондирования необходимо, с одной стороны, перейти от режима эхоскопии к режиму проходящих волн, с другой, для корректного построения изображения, учесть эффекты дифракции, частотно-зависимое затухание и дисперсию фазовой скорости. Таким образом, разработка ультразвукового метода определения внутренней структуры геосреды в режиме «на просвет» с учетом перечисленных выше эффектов представляется актуальной задачей.

Теоретические основы

В работе [15] впервые в акустике был использован метод моделирования процесса распространения упругих волн в плоскостной среде, основанный на применении ABCD-матриц. Было показано, что разработанная модель, созданный для нее алгоритм распространения упругих волн и реализующая его программа позволяют настраивать физические параметры среды и сигнала, что дает результаты, близкие к экспериментально полученным.

Настоящая работа посвящена усовершенствованию разработанной в [15] модели. Предлагаемый метод определения внутренней структуры геоматериала основывается на анализе изменений в падающем на неоднородный образец акустическом сигнале в результате прохождения его через исследуемый объ-

ект. Для анализа этих изменений используется разложение падающего (исходного/начального) сигнала, который представляет собой одиночный акустический импульс заданной длительности и временной формы, по плоским волнам. Далее рассматривается распространение каждой гармоники данного импульса с учетом эффектов дифракции с применением ABCD-матриц, а также частотно-зависимого затухания и дисперсии фазовой скорости на основе соотношения Крамерса-Кронига. Восстановленный с помощью быстрого Фурье-преобразования суммарный сигнал представляет собой суперпозицию всех переотраженных на неоднородностях и границах раздела сред импульсов. Такое представление необходимо для анализа характеристик неоднородной среды как комплексного объекта, состоящего из множества однородных подобъектов, что и позволяет определить внутреннюю структуру геоматериала.

Следует отметить, что именно применение ABCD-матриц позволяет разделить сложную картину, состоящую из большого числа перекрывающихся импульсов, на отдельные импульсы. В этом случае возможно определение посредством подбора таких характеристик среды, при которых модельный сигнал повторяет с небольшим отклонением конечный (зарегистрированный экспериментально) сигнал. В результате этого появляется возможность получить информацию о свойствах отдельных элементов среды, расположенных по направлению распространения падающего импульса.

Еще раз отметим, что основным препятствием при исследовании структуры образца в режиме «на просвет» является сложность задачи разделения влияния отдельных составляющих среды (слоев, неоднородностей) на форму конечного (зарегистрированного) сигнала. Если в

случае эхо-режима конечный сигнал представляет собой последовательность разделенных по времени прихода импульсов, отраженных от неоднородностей, то в режиме проходящих волн возникают дополнительные переотражения на неоднородностях и границах раздела сред, что значительно усложняет картину принятого акустического трека.

Таким образом, при расшифровке полученной картины требуется учитывать не только время прихода каждого сигнала и значение его амплитуды, как в эхо-режиме, но целесообразным становится также изучение формы сигнала. Учет временного профиля импульса позволяет сравнить модельный сигнал с экспериментальным.

Как отмечалось выше, изменение формы сигнала определяется частотно-зависимым затуханием и дисперсией фазовой скорости в среде, через которую проходит сигнал. Следовательно, учет данных явлений при моделировании распространения сигнала необходим для корректного восстановления внутренней структуры геоматериала в режиме «на просвет».

Согласно экспериментальным данным, полученным в работе [16], акустическое затухание в однородной среде связано с циклической частотой ω соотношением:

$$\alpha = \alpha_0 \omega^y, \quad (1)$$

где α — затухание в 1/м; α_0 — коэффициент затухания в 1/м(рад/с)^{-y}; y — степенной показатель затухания, принимающий значения в диапазоне между 0 и 3. Помимо акустического затухания, на изменение формы спектра сигнала влияет и дисперсия. Частотные зависимости затухания и дисперсии связаны соотношениями Крамерса-Кронига [16, 17], в которых частотная зависимость скорости звука $c(\omega)$ задается уравнением:

$$\frac{1}{c(\omega_2)} - \frac{1}{c(\omega_1)} = \alpha_0 \cdot \tan\left(\frac{\pi y}{2}\right) \cdot (\omega_2^{y-1} - \omega_1^{y-1}) \quad (2)$$

где $c(\omega_2)$ и $c(\omega_1)$ — соответственно, скорости на двух разных частотах ω_2 и ω_1 . Тогда зависимость волнового числа $k(\omega)$ от частоты, удовлетворяющая условиям (1) и (2), может быть представлена в виде:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} + i\alpha_0 |\omega|^y + \alpha_0 \omega |\omega|^{y-1} \cdot \tan\left(\frac{\pi y}{2}\right), \quad (3)$$

В качестве иллюстрации применения метода рассмотрим распространение одной гармоники через двухслойную среду с использованием теории, приведенной в работе [15], и выражений (1)–(3) для выделения отдельных преобразований, происходящих в процессе распространения. Предположим, что нам известно состояние этой гармоники $f(\omega)_0$ на момент начала распространения, тогда ее состояние после распространения через слой 1 до границы слоев 1–2 можно представить как:

$$f(\omega)_1 = f(\omega)_0 \cdot e^{-ik(\omega)l} \quad (4)$$

где $k(\omega)$ — частотнозависимое волновое число в слое 1, определенное по формуле (3) при условии, что α_{01} и y_1 — параметры, уникальные для слоя 1; l — толщина слоя.

Обозначим P тип преобразования, описываемый формулой (4). На границе раздела сред для каждой падающей гармоники возникнут преломленная и отраженная волны. Запишем прямое N_T и обратное N_R отношение акустических импедансов сред 1 и 2:

$$N_T = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} \quad (5)$$

$$N_R = \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\rho_1 \cdot c_1} = \frac{1}{N_T} \quad (6)$$

Тогда для амплитуд гармоник преломленной $f(\omega)_{12}$ и отраженной $f(\omega)_{11}$ волн на границе сред 1 и 2 получим выражения:

$$f(\omega)_{12} = f(\omega)_1 \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1} \quad (7)$$

$$f(\omega)_{11} = f(\omega)_1 \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1} \quad (8)$$

Обозначим T преобразование, описанное формулой (7), а R — преобразование, описанное формулой (8).

Так, обозначив типы преобразований, перейдем к рассмотрению акустических импульсов. Отметим, что преобразования, описанные формулами (4), (7), (8), верны только в случае распространения гармоники по оси, перпендикулярной границе раздела сред. Следовательно, импульс волны с плоским фронтом может быть представлен в виде:

$$I = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} d\omega, \quad (9)$$

а его преобразования P , T , R соответственно:

$$P: I_1 = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{-ik(\omega)l} d\omega, \quad (10)$$

$$T: I_1 = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1} d\omega, \quad (11)$$

$$R: I_1 = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1} d\omega. \quad (12)$$

При таком распространении отсутствует эффект дифракции. Для того чтобы его учесть, рассмотрим волну с гауссовым распределением в поперечном сечении. Тогда становится возможным применение метода ABCD-матриц [15]. Гауссов пучок в данном случае характеризуется комплексным параметром $q(\omega)$, начальное значение которого $q(\omega)_0$. Тогда преобразования (10)–(12) получают дополнительный множитель под интегралом:

$$c(q, M) = \frac{q(\omega)}{A \cdot q(\omega) + B}, \quad (13)$$

где M – ABCD-матрица; A и B – соответствующие ее коэффициенты.

Следовательно, преобразования для импульса можно представить в виде:

$$P: \begin{cases} I_1 = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{2 \cdot N_T}{N_T + 1} \cdot c(q(\omega), M_1) d\omega \\ M_1 = M_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

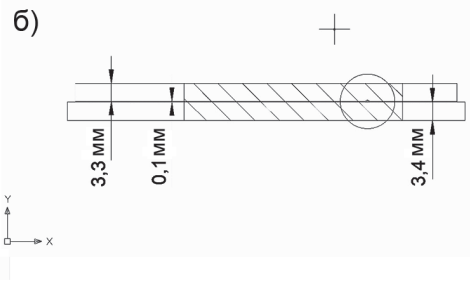
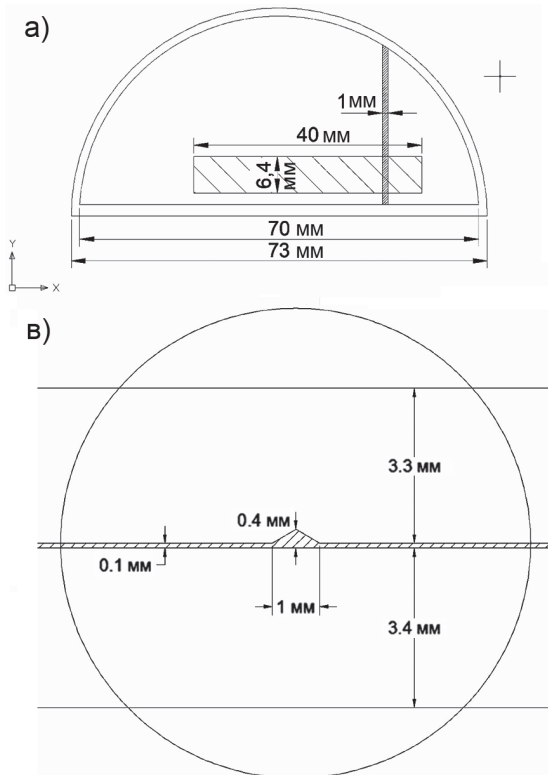
$$T: \begin{cases} I_1 = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{-i k(\omega) l} \cdot c(q(\omega), M_1) d\omega \\ M_1 = M_0 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{c_2}{c_1} \end{pmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

$$R: I_1 = \int_0^{\infty} f(\omega)_0 \cdot e^{i\omega t} \cdot \frac{N_R - 1}{N_R + 1} \cdot c(q(\omega), M_0) d\omega \quad (16)$$

Поскольку при распространении акустического импульса через слоистую среду образуется множество переотраженных импульсов, для моделирования полного сигнала, прошедшего через такую среду, требуется учесть каждый из импульсов. Полный сигнал можно представить в виде

$$G = \sum_1^N I_n, \quad (17)$$

где N – количество переотраженных импульсов, дошедших до точки измерения сигнала; I_n – представление единичного импульса, преобразованного средой в процессе распространения, ко-



Широкой штриховкой на изображениях (а) и (б) обозначена область сканирования

Узкой штриховкой на изображении (а) обозначена область, где выполнен пропил, на изображениях (б) и (в) - область, заполненная клеем

Рис. 1. Схема образца: вид сверху (а); вид сбоку (б); область пропила (в)

Fig. 1. Layout of specimen: top view (a); side view (b); saw cut (v)

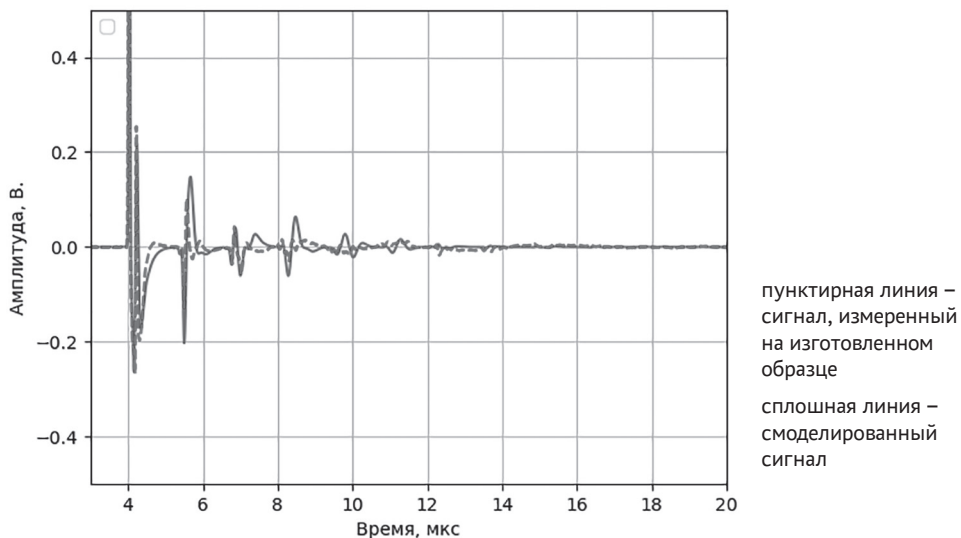


Рис. 2. Временная форма сигнала сканирования области, в которой отсутствует пропилен
 Fig. 2. Time representation of scanning signal in area without saw cut

торое равно прошедшему через преобразования P , T , R импульсу I_0 , причем результат зависит от того, как конкретно распространялся данный импульс.

Таким образом, при помощи функций (14) – (17) может быть смоделировано распространение любого акусти-

ческого сигнала с гауссовой формой в поперечном сечении через слоистую среду.

Применение метода

С целью верификации метода проведены эксперименты на специально из-

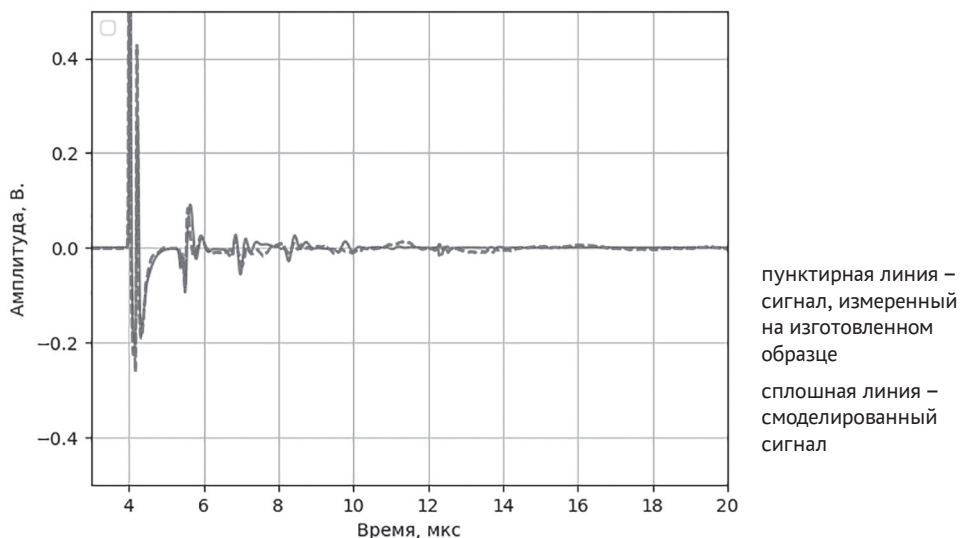


Рис. 3. Временная форма сигнала сканирования области, в которой присутствует пропилен
 Fig. 3. Time representation of scanning signal in area with saw cut

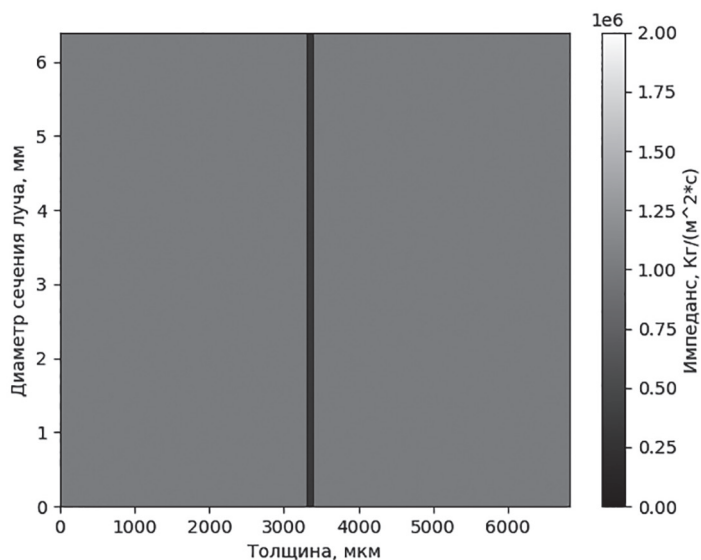


Рис. 4. Внутренняя структура, определенная по сигналу без пропила
 Fig. 4. Internal structure determined by signal without saw cut

готовленном образце, представляющем собой две склеенные пластины аргиллита (рис. 1 – 3). На одной из этих пластин выполнен пропил глубиной ~300 мкм.

На рис. 2 и 3 приведены графики временной формы для смоделированного сигнала и измеренного на изготовлен-

ном образце. На рис. 4 и 5 приведены одномерные изображения внутренних структур, определенных по сигналам на образцах без пропила (а) и с пропилом (б) соответственно. На указанных рисунках по оси X отложена толщина — линейный размер образца по направле-

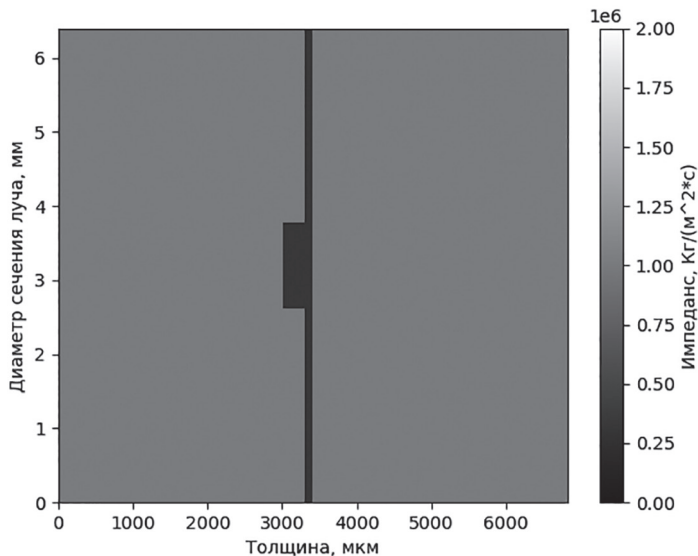


Рис. 5. Внутренняя структура, определенная по сигналу с пропилом
 Fig. 5. Internal structure determined by signal with saw cut

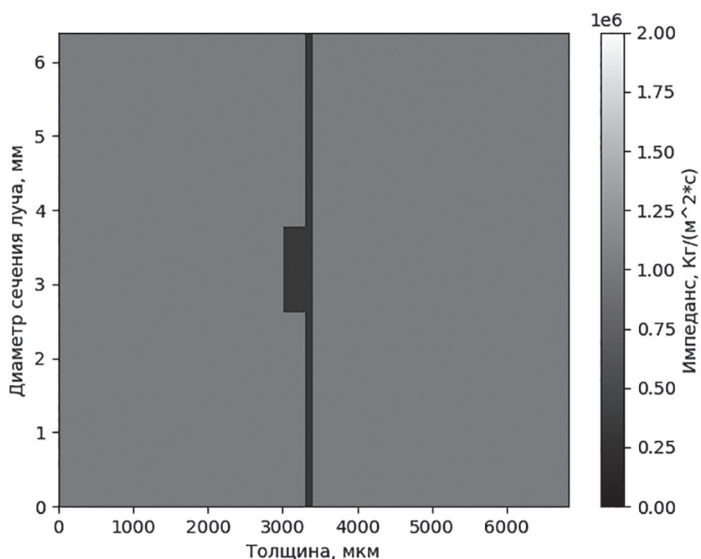


Рис. 6. Разрез вдоль оси сканирования
Fig. 6. Section along scanning axis

нию сканирования, по оси Y — диаметр сечения луча.

Однако возможны случаи, когда луч, создаваемый излучателем, имеет размер в поперечном сечении больший, чем размер неоднородности, искажается только часть сигнала. Поскольку приемник принимает только суммарный сигнал, в этих случаях судить о размере неоднородности по прошедшему сигналу бу-

дет нельзя, и возникает необходимость производить измерения в нескольких близких точках. Результат восстановленной внутренней структуры образца для одного из таких случаев представлен на рис. 6. Сравнение численных значений характеристик, полученных в результате применения метода и измеренных традиционными способами, приведено в таблице.

Численные значения характеристик Numerical values of characteristics

Слой	Пластина аргиллита с модельным дефектом		Клеевой слой	Пластина аргиллита без модельного дефекта	Полный образец из двух пластин
	Область без модельного дефекта	Область модельного дефекта с клеем			
Расчетные значения					
Скорость звука, м/с	5337	1228	1228	5325	5271
Плотность, кг/м ³	1933	3187	3187	1933	—
Толщина, мм	3,00	0,30	0,10	3,40	6,80
Измеренные значения					
Скорость звука, м/с	5354	—	—	5344	5292
Толщина, мм	3,00	0,30	—	3,40	6,80

Полученные результаты показали хорошую сходимость значений характеристик, рассчитанных при помощи разработанного метода, с реальными значениями.

Заключение

Предложенный метод позволяет учесть неоднородность исследуемой геосреды, более точно определить ее внутреннюю структуру, проводить томографические исследования УЗ-методом в режиме на просвет, определять неоднородности

размером до 100 мкм (на самом деле результат зависит от типа неоднородности и глубины ее залегания).

Исследования, выполненные данным методом, показали высокую сходимость результатов с реальными значениями соответствующих характеристик, позволили учесть слоистость структуры образца и определить не только глубину залегания неоднородности, но и ее размер как по направлению сканирования, так и в плоскости, поперечной направлению сканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко Н. М., Муравьева Ю. А. Применение методов рентгеновской микротомографии для определения пористости в керне скважин // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2012. — № 3. — С. 1–12.
2. Галкин С. В., Ефимов А. А., Кривошеков С. Н., Савицкий Я. В., Черепанов С. С. Применение метода рентгеновской томографии при петрофизических исследованиях керна нефтяных и газовых месторождений // Геология и геофизика. — 2015. — № 5. — С. 995–1007. DOI: 10.15372/GiG20150509.
3. Дробчак А. Н., Дуганов Г. А., Дучков А. А., Купер К. Э. Акустические измерения и рентгеновская томография песчаных образцов, содержащих гидрат ксенона // Геофизические технологии. — 2019. — № 4. — С. 17–23. DOI: 10.18303/2619-1563-2019-4-17.
4. Галкин С. В., Колычев И. Ю., Савицкий Я. В. Возможности исследования гидрофобизации коллекторов комплексированием методами рентгеновской томографии керна и электрического каротажа // Геология и геофизика. — 2019. — Т. 60. — № 10. — С. 1496–1507. DOI: 10.15372/GiG2019094.
5. Zhu J. B., Zhou T., Liao Z. Y., Sun L., Chen R. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behavior of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 106, pp. 198–212. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.022.
6. Галунин А. А., Степанов Г. Д., Безруков В. И., Свобода П., Кравцов А. Н. Исследование внутренней структуры образцов диабаз с помощью оптико-акустической и компьютерной рентгеновской томографии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 4-1. — С. 16–25. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_16.
7. Guntoro P. I., Ghorbani Y., Koch P.-H., Rosenkran J. X-ray microcomputed tomography (μ ct) for mineral characterization: a review of data analysis methods // Minerals. 2019, vol. 9, no. 3, p. 183. DOI: 10.3390/min9030183.
8. Martínez-Martínez J., Fusi N., Galiana-Merino J. J., Benavente D., Crosta G. B. Ultrasonic and X-ray computed tomography characterization of progressive fracture damage in low-porous carbonate rocks // Engineering Geology. 2016, vol. 200, pp. 47–57. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.11.009.
9. Tai-Ming He, Qi Zhao, Johnson Ha, Kaiwen Xia, Grasselli G. Understanding progressive rock failure and associated seismicity using ultrasonic tomography and numerical simulation // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 81, pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.tust.2018.06.022.

10. Rodriguez-Rey A., Briggs G. A. D., Field T. A., Montoto M. Acoustic microscopy of rocks // *Journal of Microscopy*. 1990, vol. 160, no. 1, pp. 21–29. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1990.tb03044.x.

11. Prasad M. Mapping impedance microstructures in rocks with acoustic microscopy // *The Leading Edge*. 2001, vol. 20, no. 2, p. 172. DOI: 10.1190/1.1438902.

12. Simpson J., van Wijk K., Adam L., Smith C. Laser ultrasonic measurements to estimate the elastic properties of rock samples under in situ conditions // *Review of Scientific Instruments*. 2019, vol. 90, no. 11, article 114503, DOI: 10.1063/1.5120078.

13. Кравцов А., Иванов П. Н., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б., Гапеев А. А. Исследование микроструктуры углей печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2019. — № 6. — С. 56–65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.

14. Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A. Improvement of image spatial resolution in optoacoustic tomography with the use of a confocal array // *Acoustical Physics*. 2018, vol. 64, no. 1, pp. 77–82. DOI: 10.1134/S1063771018010037.

15. Пашкин А. И., Винников В. А. Моделирование распространения лазерно-ультразвукового зондирующего импульса в слоистой среде методом ABCD-матриц // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2020. — № 6. — С. 140–150. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-140-150.

16. Treeby B. E. Acoustic attenuation compensation in photoacoustic tomography using time-variant filtering // *Journal of Biomedical Optics*. 2013, vol. 18, no. 3, article 036008. DOI: 10.1117/1.JBO.18.3.036008.

17. Карабутов А. А., Подымова Н. Б., Соколовская Ю. Г. Локальные соотношения Крамерса-Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах // *Акустический журнал*. — 2019. — Т. 65. — № 2. — С. 182–189. DOI: 10.1134/S0320791919020060. **ПВАБ**

REFERENCES

1. Eremenko N. M., Muravieva Y. A., Application of X-ray microtomography methods for determining porosity in well cores. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*. 2012, no. 3, pp. 1–12. [In Russ].

2. Galkin S. V., Efimov A. A., Krivoschekov S. N., Savitskiy Y. V., Cherepanov S. S. Application of the X-ray tomography method in petrophysical studies of oil and gas field cores. *Russian Geology and Geophysics*. 2015, no. 5, pp. 995–1007. [In Russ]. DOI: 10.15372/GiG20150509.

3. Drobchack A. N., Duganov G. A., Duchkov A. A., Cuper K. A. Acoustic measurements and X-ray tomography of sand samples containing xenon hydrate. *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2019, no. 4, pp. 17–23. [In Russ]. DOI: 10.18303/2619-1563-2019-4-17.

4. Galkin S. V., Kolichev I. Y., Savitskiy Y. V. Possibilities of studying the hydrophobization of reservoirs by complexing using the methods of X-ray tomography of the core and electrical logging. *Geology and Geophysics*. 2019, vol. 60, no. 10, pp. 1496–1507. [In Russ]. DOI: 10.15372/GiG2019094.

5. Zhu J. B., Zhou T., Liao Z. Y., Sun L., Chen R. Replication of internal defects and investigation of mechanical and fracture behavior of rock using 3D printing and 3D numerical methods in combination with X-ray computerized tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 106, pp. 198–212. DOI: 10.1016/j.ijrmm.2018.04.022.

6. Galunin A. A., Stepanov G. D., Bezrukov V. I., Svoboda P., Kravcov A. N. Research of the internal structure of diabase samples by optical-acoustic and computer x-ray tomography. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4-1, pp. 16–25. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_41_0_16.

7. Guntoro P. I., Ghorbani Y., Koch P.-H., Rosenkran J. X-ray microcomputed tomography (μ ct) for mineral characterization: a review of data analysis methods. *Minerals*. 2019, vol. 9, no. 3, p. 183. DOI: 10.3390/min9030183.

8. Martínez-Martínez J., Fusi N., Galiana-Merino J. J., Benavente D., Crosta G. B. Ultrasonic and X-ray computed tomography characterization of progressive fracture damage in low-porous carbonate rocks. *Engineering Geology*. 2016, vol. 200, pp. 47–57. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.11.009.

9. Tai-Ming He, Qi Zhao, Johnson Ha, Kaiwen Xia, Grasselli G. Understanding progressive rock failure and associated seismicity using ultrasonic tomography and numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 81, pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.tust.2018.06.022.

10. Rodriguez-Rey A., Briggs G. A. D., Field T. A., Montoto M. Acoustic microscopy of rocks. *Journal of Microscopy*. 1990, vol. 160, no. 1, pp. 21–29. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1990.tb03044.x.

11. Prasad M. Mapping impedance microstructures in rocks with acoustic microscopy. *The Leading Edge*. 2001, vol. 20, no. 2, p. 172. DOI: 10.1190/1.1438902.

12. Simpson J., van Wijk K., Adam L., Smith C. Laser ultrasonic measurements to estimate the elastic properties of rock samples under in situ conditions. *Review of Scientific Instruments*. 2019, vol. 90, no. 11, article 114503, DOI: 10.1063/1.5120078.

13. Kravtsov A., Ivanov P. N., Malinnikova O. N., Cherepetskaya E. B., Gapeev A. A. Laser-ultrasonic spectroscopy of the Pechora basin coal microstructure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 56–65. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.

14. Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A. Improvement of image spatial resolution in optoacoustic tomography with the use of a confocal array. *Acoustical Physics*. 2018, vol. 64, no. 1, pp. 77–82. DOI: 10.1134/S1063771018010037.

15. Pashkin A. I., Vinnikov V. A. Modeling propagation of laser-ultrasonic probing pulse in stratified medium by the method of ABCD matrices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 6, pp. 140–150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-140-150.

16. Treeby B. E. Acoustic attenuation compensation in photoacoustic tomography using time-variant filtering. *Journal of Biomedical Optics*. 2013, vol. 18, no. 3, article 036008. DOI: 10.1117/1.JBO.18.3.036008.

17. Karabutov A. A., Podimova N. B., Sokolovskaya Yu. G. Local kramers-kronig relations for the attenuation coefficient and phase velocity of longitudinal ultrasonic waves in polymer composites. *Akusticheskij Zhurnal*. 2019, vol. 65, no. 2, pp. 182–189. [In Russ]. DOI: 10.1134/S0320791919020060.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пашкин Александр Игоревич¹ — инженер,

e-mail: Alexandrill@ya.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8774-5982,

Винников Владимир Александрович¹ — д-р физ.-мат. наук,

доцент, зав. кафедрой,

e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,

Черепецкая Елена Борисовна¹ — д-р техн. наук,

профессор, e-mail: echerepetskaya@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9642-2149,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Пашкин А. И., e-mail: Alexandrill@ya.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.I. Pashkin¹, Engineer, e-mail: Alexandrill@ya.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8774-5982,
V.A. Vinnikov¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),
Assistant Professor, Head of Chair,
e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,
E.B. Cherepetskaya¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: echerepetskaya@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9642-2149,
¹ National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.I. Pashkin, e-mail: Alexandrill@ya.ru.

Получена редакцией 23.06.2022; получена после рецензии 28.06.2022; принята к печати 10.07.2022.
Received by the editors 23.06.2022; received after the review 28.06.2022; accepted for printing 10.07.2022.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОСЕПАРАТОРА С АЭРОФОНТАНИРУЮЩИМ СЛОЕМ

(№ 1258/08-22 от 06.07.2022; 9 с.)

Балахнина Е.Е.¹ — канд. техн. наук, доцент;

Андреева Ю.Е.¹ — студент,

¹ НИТУ «МИСИС».

Рассмотрен выбор параметров пневмосепаратора с аэрофонтанирующим слоем для эффективной переработки отходов дробильно-сортировочных фабрик с целью извлечения из них мелкого щебня. Предложенные в схему автономной сепарационной установки изменения произведены с целью улучшения качества продукта и расширения области применения подобных установок за счет удаления посторонних включений, содержащихся в отвалах отсевов дробления. Введение в конструкцию вставки криволинейных подполочных заслонок позволяет устранить возможность залипания мелких частиц в подполочном пространстве.

Ключевые слова: пневмосепаратор, аэрофонтанирующий слой, криволинейная подполочная вставка, материалы, переработка.

RECOMMENDATIONS ON THE CHOICE OF RATIONAL OPERATING AND DESIGN PARAMETERS OF PNEUMATIC SEPARATOR WITH AEROFONTANE LAYER

Balakhnina E.E.¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor;

Andreeva Yu.E.¹, Student,

¹ National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

This article considers the choice of parameters of a pneumatic separator with an aerofontane layer for the efficient processing of waste from crushing and grouping industries so as to extract fine crushed stones. The changes proposed in the scheme of the autonomous separation plant were made in order to improve the quality of the product and expand the scope of application of such plants by removing foreign inclusions contained in the crushing screening dumps. The introduction of curved ceiling shutters into the design allows eliminating the possibility of sticking of small particles in the subfloor space.

Key words: pneumoseparator, aerofontane layer, curved subfloor insert, materials, recycling.