

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОСНОВНОЙ И НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ КРОВЛИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ**

***Владимир Лазаревич Шкуратник***

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник тел. (499)230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru

***Петр Владимирович Николенко***

Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (499)230-25-93, e-mail: petrov-87@mail.ru

***Лариса Алексеевна Назарова***

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории горной информатики, тел. (383)330-56-70, e-mail: lanazarova@ngs.ru

Обоснован алгоритм определения акустического импеданса основной и непосредственной кровли выработок в углепородном массиве и расслоений между ними на основе ультразвуковых (УЗ) эхо-импульсных измерений. Последние проводятся со свободной поверхности кровли в ультразвуковом низкочастотном диапазоне частот с использованием отдельных или раздельно-совмещенных пьезоэлектрических преобразователей. Для получения искомой информации используют данные о модуле отношения амплитуд двукратно и однократно отраженных от исследуемых структурных неоднородностей УЗ импульсов, фазах их первых полувольт, а также времени и затухании импульсов в непосредственной кровле. Приведены соотношения, позволяющие оценить абсолютную погрешность определения искомого импеданса предлагаемым методом и рекомендации по выбору аппаратуры для реализации метода.

**Ключевые слова:** углепородный массив, горная выработка, кровля, контроль, акустический импеданс, ультразвук.

## **THEORETICAL BACKGROUNDS FOR ULTRASONIC DIAGNOSTICS OF BASIC AND IMMEDIATE ROOF IN MINE WORKINGS IN A COAL-ROCK MASS**

***Vladimir L. Shkuratnik***

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, D. Sc., Leading Researcher, tel. (499)230-25-93, e-mail: ftkp@mail.ru

***Peter V. Nikolenko***

Institute of Comprehensive Exploration of Mineral Resources RAS, 111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Ph. D., Researcher, tel. (499)230-25-93, e-mail: petrov-87@mail.ru

***Larisa A. Nazarova***

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, D. Sc., Principal Researcher, Mining Information Science Laboratory, tel. (383)330-56-70, e-mail: lanazarova@ngs.ru

The authors substantiate the algorithm of acoustic impedance evaluation for basic and immediate working roof in a coal-rock mass and stratification between them on the basis of ultrasonic echo-impulse measurements. The measurements are made from free roof surface in ultrasonic low-frequency range with the use of discrete or discrete-coupled piezoelectric transducers. The data on relation module for US-impulse amplitudes, double- and singly reflected from the study structural heterogeneities, their semi-wave phases and the time of impulse duration and damping in the immediate roof are used to obtain information in question. Ratios to estimate the absolute error of the target impedance evaluation by the new-proposed method and recommendations on the apparatus to realize the new method are provided.

**Key words:** coal-rock mass, mine working, roof, monitoring, acoustic impedance, ultrasound.

Угледородный массив является одним из наиболее сложных объектов гео-контроля, для исследований которого привлекается широкий спектр методов горной геофизики. Важнейшей задачей, которую призваны решать эти методы, является прогноз опасных горно-геологических явлений, природа и механизмы возникновения которых во многом определяются взаимодействием существующих в массиве полей напряжений и разномасштабной структурной поврежденности. Для получения информации о параметрах указанных полей и их пространственно-временной динамике наиболее эффективны активные акустические методы, что связано, в частности, с возможностью их реализации в диапазоне частот от низкочастотной сейсмики до высокочастотного ультразвука. Это, в свою очередь, позволяет, используя различные схемы акустических измерений и алгоритмы обработки их результатов, обеспечивать высокое разрешение и дистанционность контроля геосреды в существенно изменяющихся по своим размерам областях воздействия эксперимента [1–4].

Для прогноза динамических явлений в окрестностях выработок, приводящих к потере их устойчивости важной задачей является дистанционное выявление расслоений на границе непосредственной и основной кровли, а также оценка акустического импеданса последней. При этом следует иметь ввиду, что импеданс горных пород косвенно характеризует их прочностные свойства. Ниже предлагается обоснование возможности решения этой задачи с использованием ультразвуковой эхо-локации со свободной поверхности кровли.

Сущность рассматриваемой задачи сводится к следующему. В массиве на расстоянии  $d_1$  от обнажения расположен лоцируемый слой II с искомым импедансом  $Z_2$ . К свободной поверхности экранирующего слоя I приложен поршневой преобразователь в виде диска радиусом  $a$ , создающий нормальное давление  $\vec{P}_0$ . Причем импеданс  $Z_1$  слоя I известен.

В основе определения импеданса  $Z_2$  лежит предварительное получение величины коэффициента отражения УЗ импульса от границы между слоями.

$$V_{12} = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \quad (1)$$

В случае, если  $Z_1$  определен достаточно точно, связь между относительными погрешностями в определении  $Z_2$  и  $V_{12}$  описывается соотношением

$$\delta V_{12} = \frac{\Delta V_{12}}{V_{12}} = \frac{2Z_1 \cdot Z_2}{Z_2^2 - Z_1^2} \cdot \delta' Z_2, \quad (2)$$

где  $\delta' Z_2 = \frac{\Delta Z_2}{Z_2}$ .

Как следует из полученных в работе [5] результатов, относительное давление продольных волн, отразившихся произвольное число раз от плоской границы, может быть записано в виде

$$\delta P = \frac{iK_{p1} a^2}{4d_1} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n+1} \cdot V_{12}^{n+1} \cdot \exp[i2(n+1)K_{p1} \cdot d_1], \quad (3)$$

где  $K_{p1}$  – волновое число продольных волн в слое I;  $(n+1)$  – число отражений от границы слоев.

Формула (3) справедлива, если вклад боковых волн, являющихся в данном случае помеховыми, достаточно мал.

Из (3) следует, что модуль отношения амплитуд двукратно и однократно отраженных УЗ импульсов равен

$$P_{21} = |\delta P_2 / \delta P_1| = |V_{21}| \cdot 2^{-1} \exp(-2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1}). \quad (4)$$

Все входящие в (4) параметры могут быть определены экспериментально:  $d_1$  – по времени запаздывания однократно отраженных УЗ импульсов, а  $P_{21}$  – по соотношению амплитуд двукратно и однократно отраженных сигналов. Оценка затухания  $\text{Im} K_{p1}$  продольной волны в слое I в силу его доступности также не представляет сложностей. Из формулы (4) следует

$$|V_{12}| = 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1}) \quad (5)$$

Знак  $V_{12}$  определяется исходя из сравнения фаз первой полуволны одно- и двукратно отраженных импульсов. Если эти фазы совпадают [5]  $\text{sign}(V_{12}) < 0$  и имеет место отражение от слоя с  $Z_2 < Z_1$ . В противном случае  $\text{sign}(V_{12}) > 0$  и  $Z_2 > Z_1$ . С учетом этого

$$V_{12} = \text{sign}(V_{12}) \cdot 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1}). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (1), получаем

$$Z_2 = \frac{[1 + \text{sign}(V_{12}) \cdot 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1})] Z_1}{1 - \text{sign}(V_{12}) \cdot 2P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1})} \quad (7)$$

Очевидно, что при наличии заполненного воздухом расслоения между основной и непосредственной кровлей  $Z_2 \ll Z_1$ .

Погрешность определения  $Z_2$  в соответствии с (7) связана с погрешностью определения отношения амплитуд одно- и двукратно отраженных упругих импульсов и погрешностью в оценке затухания вследствие диссипации. Поэтому в формуле (2)

$$\Delta V_{12} = \text{sign}(V_{12}) \cdot 2(\delta A_2 - \delta A_1 + 2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1} \cdot \delta K_{p1}) \cdot P_{21} \exp(2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1}), \quad (8)$$

или

$$\delta V_{12} = \delta A_2 - \delta A_1 + 2d_1 \cdot \text{Im} K_{p1} \cdot \delta K_{p1}, \quad (9)$$

где  $\delta'A_1$ ,  $\delta'A_2$ ,  $\delta'K_{p1}$  – относительные погрешности в определении амплитуд одно- и двукратно отраженных сигналов;  $\delta'K_{p1} = \Delta(\text{Im}K_{p1}) / \text{Im}K_{p1}$  – относительная погрешность в определении коэффициента затухания продольных волн в слое I соответственно.

Таким образом, из (9) и (2) получаем абсолютную погрешность определения  $Z_2$

$$\Delta Z_2 = [(Z_2^2 - Z_1^2) / 2Z_1] \cdot [\delta'A_2 - \delta'A_1 + 2d_1 \cdot \Delta(\text{Im}K_{p1})] \quad (10)$$

Для реализации описанного способа определения импеданса экранируемой области массива может быть рекомендован УЗ прибор УД2-16, имеющий абсолютную чувствительность 100 дБ и позволяющий непосредственно получать величину отношения  $N$  амплитуд одно- и двукратно отраженных сигналов в диапазоне до 60 дБ с погрешностью не более  $\pm(0,5 \div 0,03 N)$  дБ.

Основной проблемой при реализации предлагаемого алгоритма диагностики основной и непосредственной кровли является возможность получения двукратного отражения УЗ сигналов от исследуемой границы в кровле. Обеспечение такой возможности требует оптимизации параметров акустической локации искомых неоднородностей. Принципы такой оптимизации изложены в [6, 7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00029).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаров Л.А. Определение свойств структурированного породного массива акустическим методом // ФТПРПИ. – 1999. – №3. – С. 36–44.
2. Захаров В.Н. Сейсмоакустическое прогнозирование и контроль состояния и свойств горных пород при разработке угольных месторождений. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 2002. – 172 с.
3. Л.А. Назарова, Л.А. Назаров, М.И. Протасов. Реконструкция объемных полей напряжений в углепородном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. – 2016. – № 4. – С. 12 – 21.
4. Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Аверин А. П. Моделирование вибрационно-колебательных процессов горных пород в призабойной зоне углепородного массива при техногенном воздействии // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 28 – 32.
5. Ямщиков В. С., Данилов В. Н., Шкуратник В. Л. Особенности возбуждения и приема упругих волн в твердом слое преобразователем поршневого типа // Дефектоскопия. – 1983. – №3. – С. 16 – 23.
6. Ямщиков В.С., Данилов В.Н., Шкуратник В.Л. Принципы оптимизации акустической локации неоднородностей в массиве // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – №5. – С. 4 – 7.
7. Ямщиков В.С., Данилов В.Н., Шкуратник В.Л., Ермолин А.А. Оценка чувствительности акустической локации массива горных пород // Изв.вузов. Горный журнал. – 1985. – №1. – С. 3 – 7.

© В. Л. Шкуратник, П. В. Николенко, Л. А. Назарова, 2017