УДК 622.02:
539.2

**В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко,
Э.Р. Митрофанов**

АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ УПРУГИХ ВОЛН В ОБРАЗЦАХ УГЛЯ ПРИ ИХ ОДНООСНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

Дано описание структурной схемы и принципов работы лабораторной установки для автоматического и одновременного измерения скоростей распространения продольных V_P и поперечных V_S упругих волн в одном и том же образце ископаемого угля в условиях его одноосного механического нагружения. Установка реализует ультразвуковой времяимпульсный метод измерений, обеспечивая необходимую точность выделения первой полуволны поперечных колебаний за счет использования информации об измеренном значении V_P, а также априорной информации о возможном соотношении между V_P и V_S в исследуемом геоматериале. Приведены полученные экспериментально на образцах каменного угля Кузнецкого бассейна зависимости V_P и V_S в функции от действующих напряжений а также полученные расчетным путем аналогичные зависимости для отношения V_P/V_S и динамического модуля упругости. Проведен анализ указанных зависимостей с точки зрения их чувствительности к стадиям деформирования.

Ключевые слова: образцы, каменный уголь, ультразвук, поперечная волна, напряженное состояние, скорость.

Введение

Активные акустические методы являются одними из наиболее перспективных геофизических методов, привлекаемых для информационного обеспечения эффективного и безопасного ведения горных работ [1–5]. Это обусловлено тем, что

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

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 11. С. 341–348.
© 2016. В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, Э.Р. Митрофанов.

информативные параметры связаны устойчивыми корреляционными связями с важнейшими физико-механическими свойствами и напряженно-деформированным состоянием геосреды и ее структурными особенностями. Кроме того, используя различные частотные диапазоны и схемы акустических измерений, возможно реализовать последние на изменяющихся в широких пределах базах контроля. Важное значение имеет также высокий достигнутый к настоящему времени уровень методического и аппаратурного обеспечения акустических измерений в массиве. Что касается дальнейшего развития акустических методов, то его обычно связывают с совершенствованием подходов к обработке получаемой измерительной информации, например на основе решения обратных задач и компьютерной томографической обработки [6, 7]. Однако, правильная интерпретация результатов указанной обработки предполагает наличие информации о взаимосвязях между измеряемыми и искомыми параметрами. Важную роль для установления указанных взаимосвязей играют ультразвуковые измерения на образцах. В качестве основных информативных параметров при таких измерениях выступают скорости распространения продольных V_P и поперечных V_S упругих волн.

Известно, что измерение величины V_S в образцах горных пород, особенно таких, как ископаемые угли, представляет собой достаточно трудную задачу. Например, используемый для таких измерений метод критических углов предполагает расположение образца в водной среде, которая неизбежно изменяет его исходные свойства [5]. Кроме того, этот метод не позволяет исследовать изменение величины V_S в функции от механического нагружения образца. При измерении V_S ультразвуковым импульсным методом отмеченные недостатки отсутствуют. В тоже время возникает проблема эффективного возбуждения и приема поперечных волн, а также выделения первого вступления последних на фоне «более быстрых» продольных волн [8]. В связи с этим в настоящей работе рассматриваются вопросы аппаратурного обеспечения совместного измерения V_P и V_S на образцах угля в условиях их одноосного механического нагружения. Указанное обеспечение позволяет повысить точность и надежность выделения первого вступления *S*-волны за счет изменения от периода к периоду порога срабатывания измерительного устройства, а также использования информации о времени t_P распространения в образце *P*-волны и примерно известном соотношении между V_P и V_S в геоматериале образца.

Особенностью полученных зависимостей V_P и V_S в функции от действующих в образце напряжений является то, что они получены в абсолютно одинаковых условиях проведения соответствующего эксперимента.

Постановка и результаты экспериментов

Объектом исследования являлись цилиндрические образцы каменного угля марки Г Кузнецкого бассейна высотой 100 мм и диаметром 50 мм. Указанные образцы были получены с использованием щадящей технологии, сочетающей алмазное резание вдоль слоев угля и последующее шлифование, из исходных кусков, отобранных из Болдыревского пласта в очистном забое шахты им. С.М. Кирова на глубине 220 м. Уголь имел следующие исходные характеристики: плотность ρ = 1400 кг/м^3, статический модуль упругости E_s = 6,0 ГПа, статический коэффициент Пуассона μ_s = 0,2, предел прочности при сжатии σ_c = 15,1 МПа.

Измерения V_P и V_S ультразвуковых колебаний (УЗК) в функции от величины одноосного механического нагружения осуществлялись с помощью установки, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Каждый из четырех однотипных образцов *1* помещался между металлическими стаканами *2* и *3*, в которых были размещены излучающий *4* и приемный *5* электроакустические преобразователи (ПЭП) поперечных УЗК с рабочей частотой f_p = 300 кГц. На указанной частоте длина продольной волны λ_P = 7,7 мм, что с учетом размеров образца обеспечивает условия распространения УЗК, соответствующие «безграничной среде».

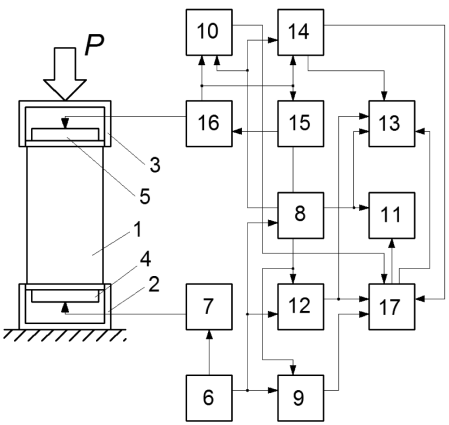

Рис. 1. Схема нагружения образца угля и измерения величин t_P и t_S в нем

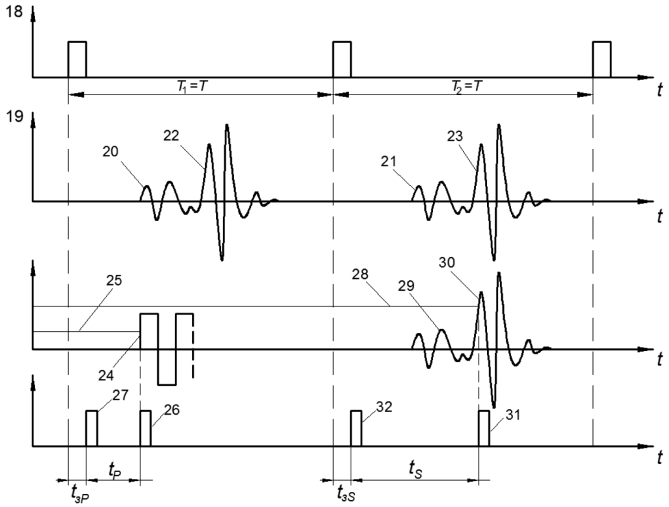

Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие принципы измерения величин tP и tS в образце угля

Давление *P*, создаваемое прессом INSTRON 300DX (на рис. 1 условно не показан), изменялось от $P = 0$ до момента разрушения образца *1* и передавалось на последний через стаканы *2* и *3*. При этом направление давления совпадало с направлением слоев.

Синхронизатор *6* импульсами *18* (рис. 2), следующими с интервалом *T*, запускает генератор *7*, электрические импульсы с выхода которого возбуждают ПЭП *4*. С помощью последнего импульсные УЗК вводятся в образец и после прохождения через него принимаются ПЭП *5*, на выходе которого имеем электрические сигналы *19* (рис. 2). Эти сигналы состоят как бы из двух составляющих, обусловленных продольными колебаниями с первыми полуволнами *20*, *21* и поперечными колебаниями с первыми полуволнами *22*, *23*. Причем, благодаря использованию ПЭП поперечных колебаний амплитуды полуволн *22*, *23* существенно превышают амплитуды полуволн *20*, *21*.

Во время периода *T*, импульс синхронизации запускает коммутатор *8*. Последний включает первый блок *9* задержки $t_{зP}$, первый формирователь *10*, индикатор *11* и отключает второй блок *12* компенсационной задержки $t_{зS}$, блок *13* формирования строба, второй формирователь *14* и блок *15* автоматической регулировки усиления (АРУ). В результате входной усилитель *16* работает в режиме ограничения. На его выходе имеем сигнал *24* в виде прямоугольных импульсов чередующейся полярности.

При превышении передним фронтом этого сигнала порогового уровня *25* первый формирователь вырабатывает импульс *26*, дающий команду на остановку управляемого счетчика *17*, который был запущен импульсом *27* с выхода первого блока задержки. Последний компенсирует время $t_{зP}$ задержки в элементах электроакустического тракта. Таким образом индикатор индицирует искомое время t_P распространения продольных УЗК в образце угля.

Во время периода T_2 коммутатор отключает первый блок задержки и первый формирователь, а индикатор переводит в режим индикации времени распространения поперечных УЗК. Кроме того он подключает второй блок компенсационной задержки, блок формирования строба и второй формирователь, а также блок АРУ к управляемому входу усилителя, который усиливает входной сигнал без искажения.

Второй формирователь имеет порог *28* срабатывания, превышающий максимальное значение амплитуды реверберационного сигнала *29* продольных УЗК. Как только этого порога достигает первая полуволна *30* поперечных УЗК формирователем вырабатывается импульс *31*, дающий команду на остановку управляемого счетчика, запуск которого был осуществлен импульсом *32* со второго блока задержки. Последний компенсирует время $t_{зS}$ задержки сигнала в элементах электроакустического тракта. В результате индикатор индицирует время tS распространения в образце поперечных УЗК.

При измерении t_S возможны ложные срабатывания второго формирователя из-за превышения реверберационным сигналом продольных УЗК порога срабатывания *28*. Для исключения таких срабатываний блок формирования строба, используя полученные в первом периоде значения t_P, а также величину $t_{зS}$, формирует строб, который включает второй формирователь на время Δt от $1{,}5t_P$ до $1{,}8t_P$. При этом значение Δt определяется априорной информацией о возможном диапазоне соотношения V_P/V_S для конкретного типа угля. Искомые значения V_P и V_S определяют по измеренным значениям t_P и t_S и известному продольному размеру образца.

На рис. 3 представлены экспериментально полученные зависимости V_P и V_S от осевой нагрузки, а также вычисленные по известным соотношениям [8] значения V_P/V_S и динамического модуля упругости $E_д$.

График зависимости $V_P(\sigma)$ позволяет выделить три стадии деформирования образца:

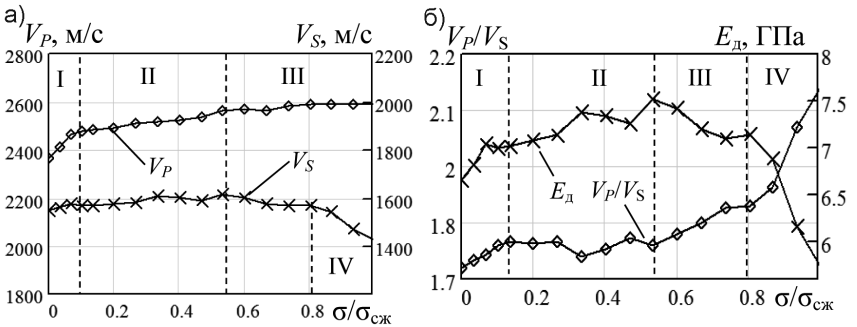

Рис. 3. Экспериментальные зависимости V_P и V_S (а), V_P/V_S и $E_д$ (б) в функции от осевой нагрузки

• I стадия начального приложения нагрузки, в процессе которого деформации нелинейно упруги в зависимости от нагрузки. Рост V_P связан с закрытием существующих пустот (трещин), расположенных перпендикулярно приложению нагрузки;

• II стадия начинается в тот момент, когда межслоевые дефекты оказываются закрытыми, а упругие деформации изменяются линейно в зависимости от нагрузки;

• III стадия начинается с образования микротрещин во всем образце. Такие микротрещины ориентированы в направлении параллельном направлению приложения осевой нагрузки. Рост микротрещин вызывает снижение роста V_P, что приводит к выполаживанию кривой $V_P(\sigma)$.

На фоне незначительно изменения характера кривой $V_P(\sigma)$ на II и III стадиях, $V_S(\sigma)$ демонстрирует высокую чувствительность к изменению степени трещиноватости, расположенной вдоль оси приложения нагрузки. Анализ $V_S(\sigma)$ позволяет выделить дополнительную IV стадию деформирования, когда микротрещины начинают сливаться в макронарушения, что характеризуется резким падением V_S при напряжениях $\sigma > 0{,}8$.

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 3, *б*, указанные стадии могут быть выделены по изменению V_P/V_S и $E_д$ в функции от осевого напряжения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что на начальных стадиях деформирования более чувствительным информативным параметром является скорость продольной упругой волны, а при приближении к $\sigma_{сж}$ для выделения стадий деформирования следует пользоваться скоростью поперечной волны или рассчитанными по результатам измерений величинами $V_P/V_S = f(\sigma)$ или $E_д = f(\sigma)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азаров Н.Я.*, *Яковлев Д.В.* Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 199 с.
2. *Назаров Л.А.* Определение свойств структурированного породного массива акустическим методом // ФТПРПИ. – 1999. – № 3 – С. 36–44.
3. *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.
4. *Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., Juan L.* An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin // Journal of Geophysics and Engineering, 2012, Vol. 9, Iss. 6, pp. 691–696.
5. *Ржевский В.В.*, *Ямщиков В.С.* Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. – М.: Недра, 1973. – 224 с.
6. *Назаров Л.А.*, *Назарова Л.А.*, *Роменский Е.И.*, *Чеверда В.А.*, *Эпов М.И.* Акустический метод определения напряженного состояния массива горных пород на основе решения обратной кинематической задачи сейсмики // Доклады академии наук. – 2016. – т. 466, № 6. – С. 718–721.
7. *Назарова Л.А.*, *Назаров Л.А.*, *Протасов М.И.* Реконструкция объемных полей напряжений в углепородном массиве на основе решения обратной задачи по томографическим данным // ФТПРПИ. – 2016. – № 4. – С. 12–21.
8. *Дзенис В.В.* Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля. – Рига: Зинатне, 1987. – 263 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шкуратник Владимир Лазаревич[1] – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: v.shkuratnik@misis.ru,
Николенко Петр Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: ftkp@mail.ru,
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
Митрофанов Эдуард Романович[1] – аспирант, e-mail: ftkp@mail.ru,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 11, pp. 341–348.

UDC 622.02: 539.2

V.L. Shkuratnik, P.V. Nikolenko, E.R. Mitrofanov

INSTRUMENTAL SUPPORT AND RESULTS OF LONGITUDINAL AND TRANSVERSE ELASTIC WAVES VELOCITY MEASURE IN COAL SAMPLES UNDER UNIAXIAL LOADING

The description of the structural schemes and principles of laboratory setup for the automatic and simultaneous measurement of the velocity of propagation of longitudinal and transverse V_S, V_P elastic waves in the same sample of fossil coal under uniaxial mechanical

loading is given. Laboratory setup implements ultrasonic transit-time measurement method, providing the required accuracy of the location of the first half-wave transverse wave with use of information of V_P measured value as well as a priori information about a possible relationship between V_P and V_S. Results are obtained experimentally on the Kuznetsk Basin coal samples. Relationships V_P and V_S as a function of operating voltages are found. V_P / V_S ratio and dynamic modulus of elasticity are calculated. The analysis of these dependencies with respect to their sensitivity to the stages of deformation.

Key words: samples, coal, ultrasonic, transverse wave, stress state, speed.

AUTHORS

Shkuratnik V.L.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher, e-mail: v.shkuratnik@misis.ru,
Nikolenko P.V., Candidate of Technical Sciences, Researcher,
e-mail: ftkp@mail.ru, Institute of Problems
of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,
Mitrofanov E.R.[1], Graduate Student, e-mail: ftkp@mail.ru,
[1] Mining Institute, National University
of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study has been supported by the Russian Science Foundation, Project No. 161700029.

REFERENCES

1. Azarov N. Ya., Yakovlev D. V. *Seysmoakusticheskiy metod prognoza gorno-geologicheskikh usloviy ekspluatatsii ugol'nykh mestorozhdeniy* (Seismic–acoustic method to predict ground conditions in coal mining), Moscow, Nedra, 1988, 199 p.

2. Nazarov L. A. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1999, no 3, pp. 36–44.

3. Zakharov V. N. *Seysmoakusticheskoe prognozirovanie i kontrol' sostoyaniya i svoystv gornykh porod pri razrabotke ugol'nykh mestorozhdeniy* (Seismo–acoustic prediction and control of rock mass condition in coal mining), Moscow, IGD im. A.A. Skochinskogo, 2002, 172 p.

4. Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., Juan L. An experimental study on the correlation between the elastic wave velocity and microfractures in coal rock from the Qingshui basin. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2012, Vol. 9, Iss. 6, pp. 691–696.

5. Rzhevskiy V. V., Yamshchikov V. S. *Akusticheskie metody issledovaniya i kontrolya gornykh porod v massive* (Acoustic methods of the analysis and control of rock masses), Moscow, Nedra, 1973, 224 p.

6. Nazarov L. A., Nazarova L. A., Romenskiy E. I., Cheverda V. A., Epov M. I. *Doklady akademii nauk*, 2016, vol. 466, no 6, pp. 718–721.

7. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Протасов М. И. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no 4, pp. 12–21.

8. Dzenis V. V. *Primenenie ul'trazvukovykh preobrazovateley s tochechnym kontaktom dlya nerazrushayushchego kontrolya* (Application of pinpoint-contact ultrasonic transducers to nondestructive control), Riga, Zinatne, 1987, 263 p.