

УДК 622.02:539.2

**ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И АМПЛИТУДЫ  
ПРОДОЛЬНЫХ УПРУГИХ ВОЛН ОТ НАПРЯЖЕНИЙ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОГО УГЛЯ**

**В. Л. Шкуратник<sup>1</sup>, П. В. Николенко<sup>1</sup>, А. Е. Кошелев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: ftkp@mail.ru,  
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*ООО “Газпром геотехнологии”,  
ул. Строителей, 8, к. 1, 119311, г. Москва, Россия*

Экспериментально установлены закономерности распространения продольных упругих волн ультразвукового диапазона частот в образцах каменного угля при одноосном и всестороннем (по схеме Кармана) сжатии. Показано, что при одноосном сжатии наибольшей информативностью обладает прозвучивание в направлении перпендикулярном слоистости и оси нагружения. При таком прозвучивании оказывается возможным выделение четырех стадий деформирования образца. При трехосном нагружении информативность прозвучивания падает с увеличением бокового давления, которое препятствует дезинтеграции угля. Наиболее четко четыре стадии деформирования выделяются при боковом давлении 2.5 МПа, а при давлениях 10 МПа удается выделить лишь стадии консолидации и разрушения образца.

*Каменный уголь, упругие волны, образец, лабораторный эксперимент, ультразвук, одно- и двухосное нагружение, Кузнецкий угольный бассейн*

Для оценки структурных особенностей, напряженно-деформированного состояния углепородного массива, обнаружения в нем различных типов нарушений и прогноза опасных динамических явлений широкое распространение получили акустические методы [1–8]. Их преимущества перед другими методами горной геофизики обусловлены многообразием типов, информативных параметров и диапазонов частот используемых упругих волн, возможностью реализации контроля в активном и пассивном режимах при различных размерах области воздействия эксперимента и ее ориентации относительно волнового измерительного канала [9].

Независимо от сути конкретного акустического метода и масштабов проводимых с его помощью исследований, для правильной интерпретации последних необходимо наличие первичной информации об акустических свойствах угля и их изменении под влиянием действующих в массиве факторов различной физической природы. Такую информацию получают, как правило, на образцах в ультразвуковом (УЗ) диапазоне частот. Затем ее применяют для решения различных задач геоконтроля на основе известных функциональных или корреляционных зависимостей акустических информативных параметров, с одной стороны, свойств и состояния ископаемых углей — с другой. В частности, зависимости скорости распространения упругих волн в образцах угля при различных режимах трехосного нагружения необходимы для определения напряженно-деформированного состояния массива на основе решения обратной кинематической задачи сейсмики [10, 11].

---

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

Накопленный опыт в области изучения акустических свойств образцов горных пород при различных режимах нагружения [12–16] свидетельствует как о высокой информативности таких исследований, так и о высокой степени проработки методического и аппаратного обеспечения лабораторных экспериментов. Важно отметить, что для ископаемых углей характерна существенная неоднородность структуры и петрофизических свойств, которые во многом индивидуальны не только для конкретного месторождения и пласта, но и конкретного участка последнего. Несмотря на имеющиеся работы, посвященные изучению акустических свойств угля на образцах в условиях одноосного и сложного напряженного состояния [17–23], соответствующие исследования должны быть продолжены.

### ПОСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Объектом исследований являлись образцы каменного угля марки Г Кузнецкого бассейна, отобранные из Болдыревского пласта в очистном забое шахты им. С. М. Кирова на глубине 220 м. Усредненные результаты экспериментального определения физико-механических свойств этого угля в ненагруженном состоянии следующие: плотность  $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$ ; скорость распространения продольных упругих волн  $V_p = 2310 \text{ м/с}$ , поперечных  $V_s = 1400 \text{ м/с}$ ; статический модуль упругости  $E_{st} = 6.0 \text{ ГПа}$ , динамический  $E_d = 6.7 \text{ ГПа}$ ; статический коэффициент Пуассона  $\mu_{st} = 0.20$ , динамический  $\mu_d = 0.21$ ; предел прочности при сжатии  $\sigma_c = 15.1 \text{ МПа}$ ; общая пористость  $\Pi = 3.5 \%$ ; коэффициент крепости по Протождяконову  $f = 1.5$ .

Для проведения испытаний использовано 25 образцов цилиндрической формы диаметром 50 мм и высотой 100 мм с плоскопараллельными торцевыми поверхностями. Получение таких образцов представляет собой серьезную проблему из-за неоднородности, относительно низкой прочности, разномасштабной поврежденности и слоистости угля. Применительно к конкретному исследуемому типу угля предварительно опробованы различные технологии изготовления образцов [24]. Установлено, что технология, предполагающая высокоскоростное резание исходного куска угля вдоль слоистости с помощью алмазного дискового инструмента, обеспечивает минимум привнесенной нарушенности и изменений физико-механических свойств. Изготовление образца происходит в три этапа: на первом и втором резанием получают четырехгранную, а затем восьмигранную призмы соответственно, на третьем ступенчатым шлифованием доводят призматический образец до цилиндрической формы заданных размеров с достаточно ровными и параллельными торцевыми поверхностями.

Первая серия испытаний выполнялась с целью установления влияния одноосного нагружения на информативные параметры принятого сигнала. Группа из пяти однотипных образцов подвергалась одноосному нагружению вплоть до разрушения с помощью прессового оборудования INSTRON 300DX с максимальным усилием сжатия до 300 кН. Одновременно с нагружением велось измерение скорости  $V_p$  распространения продольных упругих волн и амплитуды  $A_p$  первого вступления принятого импульсного сигнала с помощью низкочастотного УЗ дефектоскопа УД2Н-ПМ на рабочей частоте пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) 200 кГц. Прозвучивание каждого из образцов осуществлялось как вдоль его оси (совпадающей с направлением механического нагружения и слоистости), так и в перпендикулярном направлении. При этом в первом случае излучающий и приемный ПЭП размещались в металлических стаканах, через которые нагрузка передавалась на образец, а во втором — на диаметрально противоположных сторонах образца в центральном его сечении. Примеры характерных зависимостей  $V_p$  и  $A_p$  от осевой нагрузки  $\sigma$  (в долях от предела прочности  $\sigma_c$ ) приведены на рис. 1.

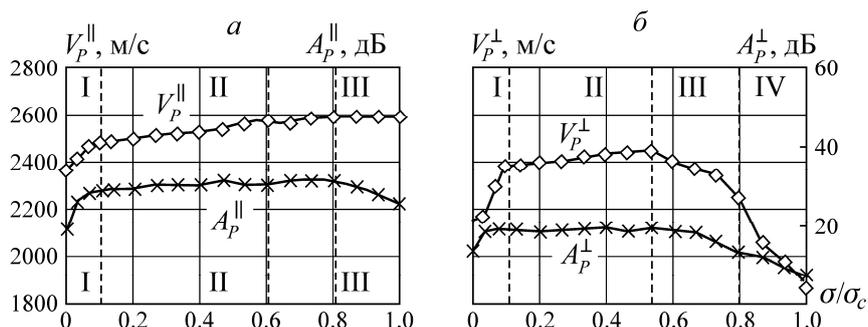


Рис. 1. Зависимости  $V_p$  и  $A_p$  от осевой нагрузки  $\sigma$  при продольном (а) и поперечном (б) прозвучивании образца угля

В дополнение к описанным исследованиям выполнено одноосное нагружение призматического образца угля с основанием  $40 \times 40$  мм и высотой 80 мм с одновременной фотофиксацией боковой грани на различных стадиях нагружения (рис. 2).

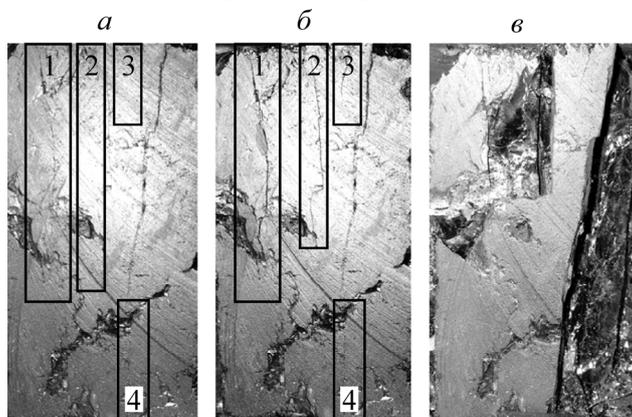


Рис. 2. Фотофиксация поверхности образца угля при осевой нагрузке  $0.6\sigma_c$  (а),  $0.8\sigma_c$  (б),  $1.0\sigma_c$  (в) (прямоугольниками выделено образование новых и рост существующих трещин)

Цель второй серии испытаний — определение влияния сложного напряженного состояния на скорость распространения продольной волны и амплитудные характеристики сигнала. Трехосное (по схеме Кармана) нагружение осуществлялось на установке УДС 65/80, позволяющей проводить испытания при осевом напряжении до 80 МПа и боковом до 50 МПа. Как и при одноосном нагружении, давление на образец передавалось через стальные стаканы, в которых размещены ПЭП.

Испытано 20 образцов, разбитых на четыре группы. Образцы каждой группы подвергались одинаковому первоначальному гидростатическому боковому обжатию  $\sigma_2$  до уровней 2.0, 4.5, 7.5 и 10 МПа соответственно. Все образцы доводились до разрушения. Полученные в процессе испытаний характерные зависимости  $V_p$  и  $A_p$  показаны на рис. 3.

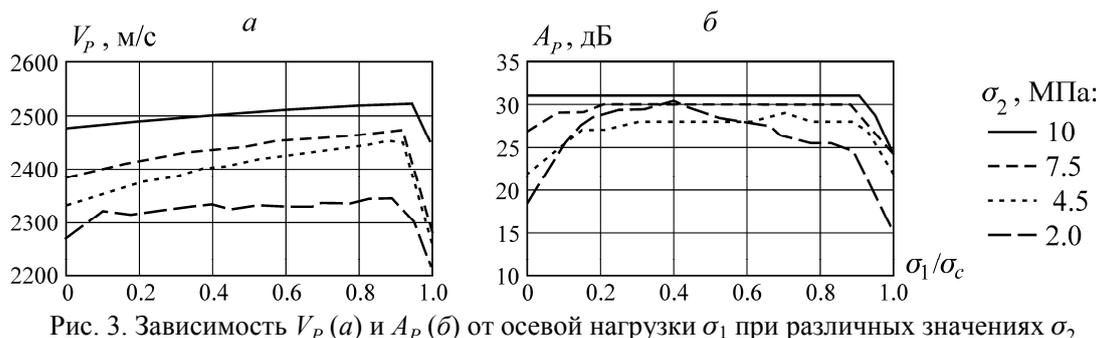


Рис. 3. Зависимость  $V_p$  (а) и  $A_p$  (б) от осевой нагрузки  $\sigma_1$  при различных значениях  $\sigma_2$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Анализ экспериментальных данных, представленных на рис. 1, свидетельствует, что изменения величин  $V_p^{\parallel}$  и  $A_p^{\parallel}$  с различной чувствительностью отражают структурные изменения в образце при его одноосном нагружении. На стадии деформирования I до уровня  $0.1\sigma_c$  происходит наиболее резкое и нелинейное изменение  $V_p^{\parallel}$  и  $A_p^{\parallel}$ , что связано с закрытием существующих микротрещин и пустот вдоль волнового измерительного канала. При этом значение  $V_p^{\parallel}$  изменяется примерно на 5%, а  $A_p^{\parallel}$  — примерно на 10 дБ, т. е. в 3 раза.

На стадии деформирования II геоматериал уплотняется, что приводит к относительно линейным изменениям  $V_p^{\parallel}$  и  $A_p^{\parallel}$ . Верхняя граница этой стадии по измерениям  $V_p^{\parallel}$  составляет  $0.6\sigma_c$ , а по измерениям  $A_p^{\parallel}$  —  $0.8\sigma_c$ . Начиная от  $0.6\sigma_c$  с увеличением  $\sigma$  изменения  $V_p^{\parallel}$  практически прекращаются, т. е. достигается стадия максимального уплотнения. В конце этой стадии при  $\sigma \approx \sigma_c$  геоматериал настолько быстро разуплотняется, а затем и разрушается, что зафиксировать при этом падение скорости  $V_p^{\parallel}$ , учитывая ее малую информативность, практически не удастся. Указанное разуплотнение, которое начинается при  $0.8\sigma_c$ , четко фиксируется по уменьшению  $A_p^{\parallel}$  и свидетельствует о начале процессов дезинтеграции образца на стадии нагружения III, что может служить предвестником приближающегося разрушения.

При поперечном прозвучивании образца угля, т. е. в направлении, ортогональном слоистости и механическому нагружению, на всех стадиях деформирования выполняются соотношения  $V_p^{\perp} < V_p^{\parallel}$  и  $A_p^{\perp} < A_p^{\parallel}$  (рис. 3). Такой результат представляется достаточно очевидным, если учесть чувствительность параметров  $V_p$  и  $A_p$  к ориентации возникающих при нагружении трещин. Высокая чувствительность позволяет выделить четыре стадии деформирования образца. Первые две соответствуют первичному закрытию существующих трещин, уплотнению образца и совпадают со стадиями, выделяемыми при продольном прозвучивании. На стадии III наблюдается образование новых и рост существующих микротрещин, что приводит к снижению как  $V_p^{\perp}$ , так и  $A_p^{\perp}$ . Стадия IV характеризуется резким падением обоих информативных параметров на фоне слияния микротрещин в макронарушения. Отметим, что трещинообразование в образце происходит преимущественно вдоль направления нагружения и слоистости, что подтверждается рис. 2. При этом, как показано теоретически и экспериментально в [25], параметр  $V_p$  обладает максимальной чувствительностью к трещинам, ортогональным направлению распространения продольных волн, что обуславливает низкую информативность продольного прозвучивания и высокую информативность поперечного.

Анализ приведенных на рис. 3 результатов изменений  $V_p$  и  $A_p$  в образцах каменного угля при их трехосном осесимметричном нагружении свидетельствует о следующем. Увеличение бокового давления  $\sigma_2$  препятствует процессам дезинтеграции образцов и снижает возможность выявления их стадий деформирования. Так, если при  $\sigma_2 = 2$  МПа по зависимости  $V_p = f(\sigma_1 / \sigma_c)$  выделяются три стадии деформирования, то начиная с  $\sigma_2 \geq 4.5$  МПа — только две: постепенного уплотнения образца и соответствующего увеличения  $V_p$ , а также разрушения, при котором знак производной  $V_p$  резко меняется на противоположный. С увеличением  $\sigma_2$ , начиная со значения 4.5 МПа, изменения  $V_p$  на стадии уплотнения становятся все более линейными.

Аналогичные закономерности наблюдаются при анализе зависимостей  $A_p = f(\sigma_1 / \sigma_c)$ , представленных на рис. 3б. При малых значениях  $\sigma_2$  удастся выделить четыре стадии деформирования: быстрое нарастание  $A_p$  до уровня  $0.2\sigma_c$ , плавный рост  $A_p$  на фоне консолидации образца

до  $0.4\sigma_c$ , начало разрушения образца с плавным спадом  $A_p$  до  $0.9\sigma_c$  и последующее разрушение, сопровождающееся резким уменьшением амплитуды зондирующего УЗ сигнала. Однако при росте  $\sigma_2$  информация о стадиях деформирования теряется, в результате удается выделить лишь две при  $\sigma_2 = 10$  МПа.

### ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование влияния различных режимов одноосного и трехосного нагружения образцов каменного угля на кинематические и динамические параметры импульсного ультразвукового сигнала дает возможность оценить их информативность при выявлении различных стадий деформирования. Показано влияние на указанную информативность ориентации акустического измерительного канала относительно направлений одноосного механического нагружения и слоистой структуры образца. Установлено, что увеличение статической осесимметричной боковой нагрузки на образец уменьшает степень его дезинтеграции под влиянием осевого механического нагружения и, как следствие, не позволяет выявлять все основные стадии деформирования угля с использованием акустических информативных параметров контроля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опарин В. Н., Еманов А. Ф., Востриков В. И., Цибизов Л. В.** О кинетических особенностях развития сейсмоэмиссионных процессов при отработке угольных месторождений Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 3–22.
2. **Азаров Н. Я., Яковлев Д. В.** Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. — М.: Недра, 1988. — 199 с.
3. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. IV // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 3–49.
4. **Назаров Л. А.** Определение свойств структурированного породного массива акустическим методом // ФТПРПИ. — 1999. — №3. — С. 36–44.
5. **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.
6. **Feng Z., Mingjie X., Zhonggao M., Liang C., Zhu Z., and 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, Issue 6. — P. 691–696.
7. **Zagorskii L. S., Shkuratnik V. L.** Method of determining the vertical seismic profile of a rock massif using Rayleigh-type waves, *Acoustical Physics*, 2013, Vol. 59, Issue 2. — P. 197–206.
8. **Nikolenko P. V., Shkuratnik V. L.** Acoustic emission in composites and applications for stress monitoring in rock masses, *Journal of Mining Science*, 2014, Vol. 50, Issue 6. — P. 1088–1093.
9. **Ржевский В. В., Ямщиков В. С.** Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. — М.: Недра, 1973. — 224 с.
10. **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 сейсмоки // ДАН. — 2016. — Т. 466. — № 6. — С. 718–721.
11. **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.

12. **Иванов В. И., Белов Н. И.** Влияние составляющих тензора напряжений на оценку напряженного состояния пород по скоростям упругих волн // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР. — 1985. — С. 3–6.
13. **Fjaer E.** Static and dynamic moduli of a weak sandstone, *Geophysics.*, 2009, Vol. 74(2), WA103–WA112.
14. **Pervukhina M., Gurevich B., Dewhurst D. N., Siggins A. F.** Applicability of velocity–stress relationships based on the dual porosity concept to isotropic porous rocks, *Geophysical Journal International*, 2010, Vol. 181, No. 3. — P. 1473–1479.
15. **Lokajiček T., Svitek T., Petružálek M.** Laboratory approach to the study of dynamic and static bulk anisotropy in rock under high hydrostatic pressure by simultaneous P, S sounding and sample deformation measurements on spheres, 48th US Rock Mechanics, *Geomechanics Symposium*, 2014, Vol. 2. — P. 988–994.
16. **Pimienta L., Fortin J., and Guéguen Y.** Bulk modulus dispersion and attenuation in sandstones, *Geophysics*, 2015, Vol. 80, Issue. 2. — P. 111–127.
17. **Meng Z.-P., Zhang J.-C., and Tiedemann J.** Relationship between physical and mechanical parameters and acoustic wave velocity of coal measures rocks, *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, Vol. 49, Issue 5. — P. 1505–1510.
18. **Wei X., Wang S.-X., Zhao J.-G., Tang G.-Y., Deng J.-X.** Laboratory study of velocity dispersion of the seismic wave in fluid-saturated sandstones, *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, Vol. 58, Issue. 9. — P. 3380–3388.
19. **Zheng Z., Khodaverdian M., McLennan J. D.** Static and dynamic testing of coal specimens, *SCA Conference*, 1991. — P. 9120.
20. **Yao Q., and D. Han.** Acoustic properties of coal from lab measurement: 80th Annual International Meeting, 2008. SEG, *Expanded Abstracts*, 27. — P. 1815–1819.
21. **Haibo Wu, Shouhua Dong, Donghui Li, Yaping Huang, Xuemei Qi.** Experimental study on dynamic elastic parameters of coal samples, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, Vol. 25, No. 3. — P. 447–452.
22. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н.** Об особенностях развития нелинейных деформационно-волновых процессов в угольных образцах различной стадии метаморфизма при их нагружении до разрушения в изменяющемся поле температур // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 3–24.
23. **Cai Y., Liu D., Mathews J. P., Pan Z., Elsworth D., Yao Y., Li J., and Guo X.** Permeability evolution in fractured coal - Combining triaxial confinement with X-ray computed tomography, acoustic emission and ultrasonic techniques, *International Journal of Coal Geology*, 2014, Vol. 45. — P. 91–104.
24. **Shea V. R., Hanson D. R.** Elastic wave velocity and attenuation as used to define phases of loading and failure in coal, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1988, Vol. 25, Issue. 6. — P. 431–437.
25. **Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Бобров А. В.** О количественной оценке микротрещиноватости горных пород ультразвуковым велосиметрическим методом // ФТПРПИ. — 1985. — № 4. — С. 110–114.

*Поступила в редакцию 11/VII 2016*