

УДК 622.02:539.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАРУШЕНИЙ СПЛОШНОСТИ
НА СКОРОСТИ УПРУГИХ ВОЛН В НАПРЯЖЕННЫХ ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

П. В. Николенко, М. Г. Зайцев

*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
E-mail: p.nikolenko@misis.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

Проведено экспериментальное исследование скоростей распространения упругих волн в образцах горных пород до и после образования горизонтальной магистральной трещины. Показано, что в ненарушенных образцах не наблюдается существенного изменения скоростей продольных волн при увеличении осевого давления от 0 до 20 МПа. Наличие трещины приводит к росту скоростей за счет постепенного сближения ее берегов. Для повышения чувствительности кинематических ультразвуковых параметров к механическим напряжениям реализован алгоритм интерферометрии на кодах волн, заключающийся в анализе времен первого вступления многократно рассеянных волн. Применение указанного алгоритма приводит к существенному увеличению чувствительности ультразвукового контроля даже в однородных образцах.

Напряженно-деформированное состояние, горные породы, ультразвук, кода волны, трещина, контроль

DOI: 10.15372/FTPRPI20220608

ПРИНЦИПЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Элементы теории акустоупругости широко используются для контроля напряженно-деформированного состояния породных образцов в лабораторных условиях [1, 2]. В этом случае направление прозвучивания совпадает с направлением приложения механического напряжения. Для получения информации о напряженно-деформированном состоянии массива in-situ применяются акустические методы в вариантах межскважинного прозвучивания и каротажа [3]. В качестве зондирующих сигналов традиционно используются ультразвуковые импульсы, где информативный параметр — скорость распространения продольных волн V_p в прискважинной области массива [4–6]. В [7] показано, что повышение напряжений приводит к росту V_p на упругой и упруго-пластичной стадиях деформирования. Такие результаты получены на ненарушенных образцах относительно пластичных каменных углей путем сквозного прозвучивания (оси акустических преобразователей совпадают с направлением приложения дав-

ления). Особенностью проведения каротажных измерений является невозможность соосного расположения акустических преобразователей. В большинстве случаев измерительные скважины не заполнены водой, поэтому для передачи энергии ультразвуковых колебаний в исследуемую среду применяется сухой акустический контакт с пневматическими прижимающими устройствами. Такой контакт обладает низкой повторяемостью и препятствует использованию более информативных параметров контроля, например амплитуды первых вступлений и спектральных характеристик сигналов [7–11]. Повысить надежность и повторяемость контактных условий могло бы опережающее лазерное сканирование стенок скважины [12], подобное оборудование находится в разработке. При каротаже реального массива на пути прозвучивания могут встречаться различные неоднородности, в том числе трещины, оказывающие существенное влияние на параметры ультразвуковых сигналов в различных условиях напряженно-деформированного состояния [13–15].

Применение принципов обработки сигналов, основанных на анализе параметров упругих волн многократно отраженных от возникающих в среде неоднородностей, направлено на повышение чувствительности кинематических характеристик ультразвуковых сигналов к изменениям напряженно-деформированного состояния пород. В практике ультразвукового контроля принято считать, что основная информация о строении и состоянии геосреды содержится в головной части сигнала. По ней определяются времена первого вступления продольных и поперечных волн, а также их амплитуды. В хвосте сигнала обычно содержится информация о колебаниях, прошедших значительно больший путь, чем кратчайшее расстояние от излучателя к приемнику. Такая часть волнового пакета называется кодой волны. Увеличение пути связано с явлениями рэлеевского рассеяния и дифракции ультразвука на неоднородностях. Энергия таких колебаний, как правило, меньше энергии прямой волны (рис. 1). В коде волны содержится больше информации о различных неоднородностях в исследуемой среде, чем в головной части сигнала.

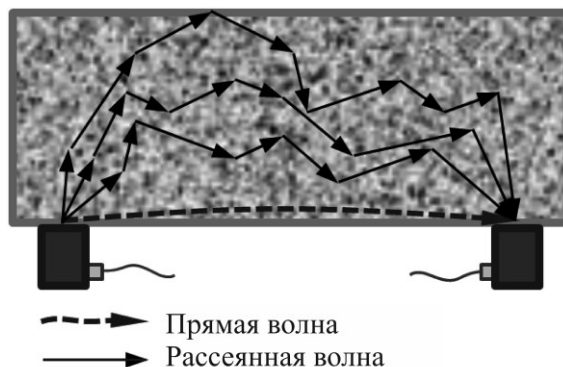


Рис. 1. Распространение упругих волн в гетерогенной среде

Для изучения коды ультразвуковых колебаний на данный момент применяется комплекс методических приемов — интерферометрия на кодах волн (CWI). На фиксированной базе проводится прозвучивание участка объекта исследования, при этом записанная волновая форма несет информацию об исходном состоянии среды. Повторное прозвучивание выполняется после механического или температурного воздействия. Суть CWI сводится к совместной обработке сигналов, полученных до и после воздействия. На рис. 2 представлен пример волновых форм сигналов, зарегистрированных на образце железистого кварцита, подвергаемого одноосному сжатию.

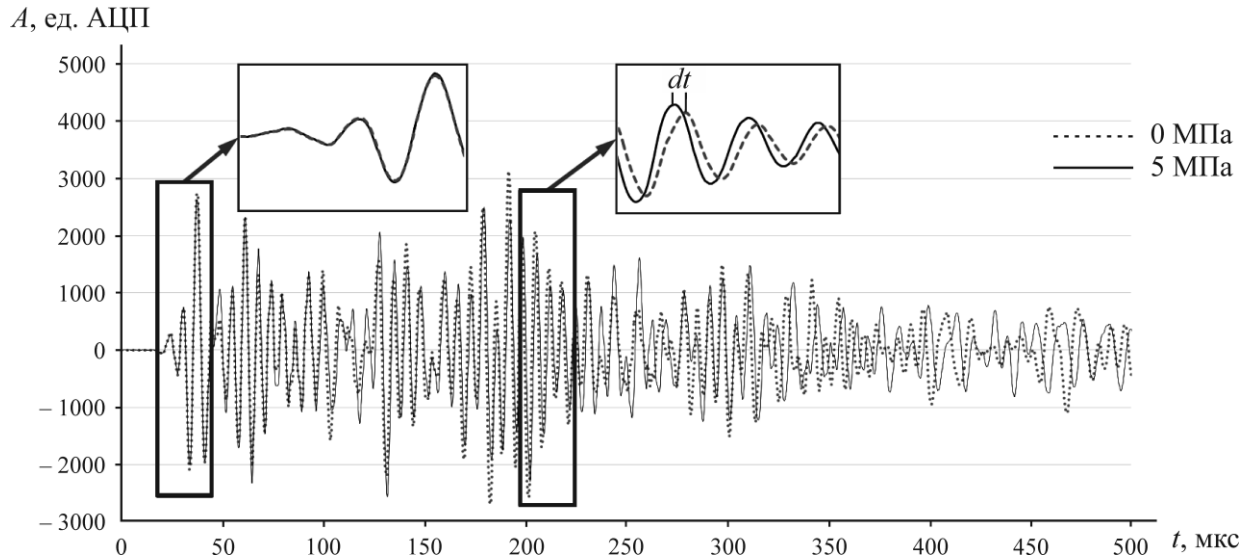


Рис. 2. Волновые формы зарегистрированных на образце железистого кварцита импульсов при уровнях осевой нагрузки 0 и 5 МПа

Видно, что в головной части сигнала не наблюдается существенных различий между волновыми формами — время и амплитуда первого вступления практически идентичны. В коде волны, напротив, отмечается смещение сигналов на некоторый временной лаг. Алгоритм CWI предназначен для получения истинного значения временного смещения в коде волны dt . Для этого рассчитывается коэффициент корреляции:

$$CC_k(\tau) = \frac{\int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} A'(t-\tau)A(t)dt}{\sqrt{\int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} A'^2(t-\tau)dt \int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} A^2(t)dt}},$$

где A , A' — амплитуды волновых форм соответственно до и после воздействия; T — общая длительность сигнала; t_k — центр волнового окна (подбирается эмпирически).

Для определения dt обычно проводится расчет серии CC_k при разных τ и выбирается значение при максимальном коэффициенте корреляции. Однако традиционная корреляционная обработка, предполагающая смещение одной волновой формы относительно другой до достижения максимума коэффициента корреляции, не подходит для поиска значений dt . Как отмечалось, смещения в коде волны вызваны увеличением пути прохождения из-за многочисленных переотражений. Более поздние времена волновых форм соответствуют волнам, прошедшим больший путь, поэтому смещения сигналов не являются постоянными величинами, а практически линейно возрастают от “головы” до “хвоста” сигнала с ростом количества рассеивающих дефектов. При реализации CWI используется два методических приема определения dt — дублетная техника (DT) и техника растягивания волновой формы (ST) [16–20]. Согласно методу DT, выбирается несколько малых временных окон, находится временная задержка Δt для каждого временного окна и принимается среднее значение задержек за истинное значение dt . Очевидно, что выбор нескольких дискретных окон для вычисления лага

задержки не обеспечивает достаточно высокого временного разрешения, поэтому в последнее время большее распространение получил метод ST. В данном случае в расчете участвуют не отдельные части сигнала, а вся волновая форма. Один сигнал плавно “растягивается” относительно другого за счет интерполяции. При достаточной дискретизации сигнала (10 и более отсчетов на период) вполне допустимо использовать кусочно-линейную интерполяцию. По сравнению с DT метод ST обладает более высокой точностью, он более обоснован с физической точки зрения, так как предполагает линейный рост смещения сигналов с увеличением времени распространения упругих волн.

Известны работы с использованием CWI на различных конструкционных материалах, подвергаемых механическому и температурному воздействию [21–24]. В [25] описывается CWI на образцах бетона, подвергаемых одноосному нагружению. Показана практически линейная связь между изменением dt и значениями осевой нагрузки, при этом существенных изменений во времени первого вступления продольной волны не выявлено. Наряду с лабораторными исследованиями накоплен опыт применения CWI для оценки напряжений и дефектообразования в различных промышленных конструкциях и сооружениях [26–28]. Использование CWI приводит к повышению чувствительности ультразвукового прозвучивания к возникновению микродефектов при различных воздействиях.

Цель настоящей работы — исследование особенностей применения CWI на образцах пород различных генотипов под действием одноосного нагружения, а также оценка влияния трещин в образцах на результаты ультразвукового прозвучивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривались три группы образцов горных пород различных генотипов. Группа “ЖК” представлена образцами железистого кварцита КМА, группа “Д” — доломитами Данковского месторождения, группа “Г” — образцами гранита Мансуровского месторождения. Для каждой группы подготовлено по пять призматических образцов $40 \times 40 \times 80$ мм. Усредненные по группам физические свойства образцов приведены в таблице.

Свойства пород

Группа	Плотность, кг/м ³	Прочность на одноосное сжатие, МПа	V_p , м/с	Пористость, %
ЖК	3300	220	4700	1.4
Д	2280	100	3340	14.1
Г	2640	126	3845	5.2

Исследования выполнены на лабораторном стенде (рис. 3), который включает в себя электромеханический пресс ГТ 2.0.8-2 для одноосного нагружения образцов, а также комплекс для ультразвуковых измерений, состоящий из генератора импульсов, двух преобразователей с центральной частотой 200 кГц, предусилителя ПАЭФ-014 и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Е20-10 с частотой дискретизации 5 МГц, подключенного к персональному компьютеру. Прозвучивание проводилось с боковой поверхности образца, тем самым имитировался процесс каротажных измерений в необводненной скважине.

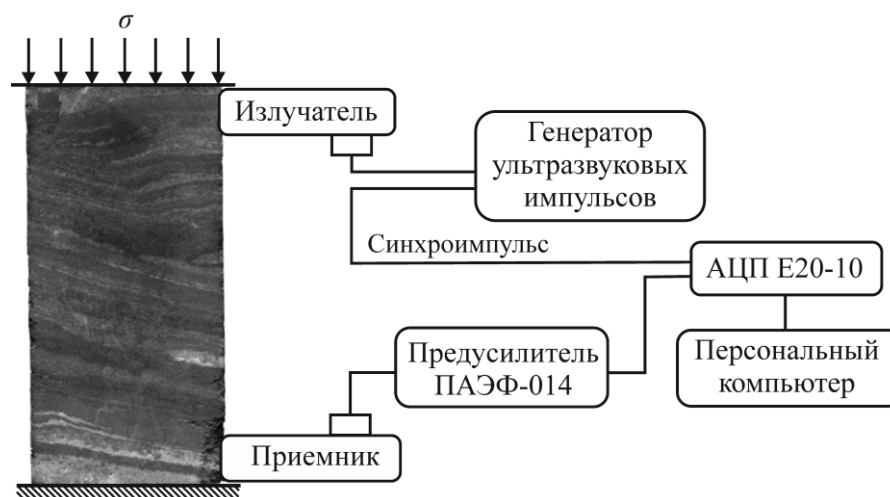


Рис. 3. Схема лабораторного стенда

Породы испытывались по трехэтапной схеме. На первом этапе образец подвергался одноосному сжатию с скоростью 0.1 МПа/с. Одновременно с нагрузкой регистрировались волновые формы длительностью 4096 отсчетов с шагом 1 с. В результате испытания одного образца формировался массив из 200 волновых форм. В рамках второго этапа испытаний образец раскалывался по трехточечной схеме на две половины. На третьем этапе испытаний половины составлялись и образец с горизонтальной трещиной повторно испытывался по описанному алгоритму. Общий вид образцов до и после раскола представлен на рис. 4.

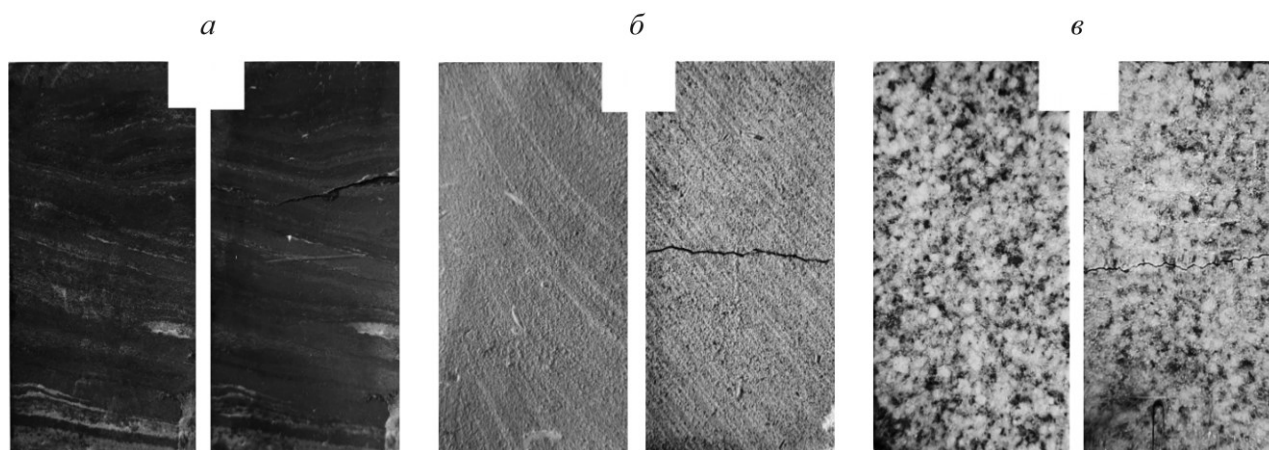


Рис. 4. Примеры поверхностей образцов группы "ЖК" (а), "Д" (б) и "Г" (в) до и после раскола по трехточечной схеме

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Начальным этапом обработки стало определение времен первого вступления продольной волны t_0 и расчет на их основе скоростей продольных волн V_p . Усредненные по группам значения скоростей продольных волн в функции от осевого давления для образцов до и после образования трещины приведены на рис. 5.

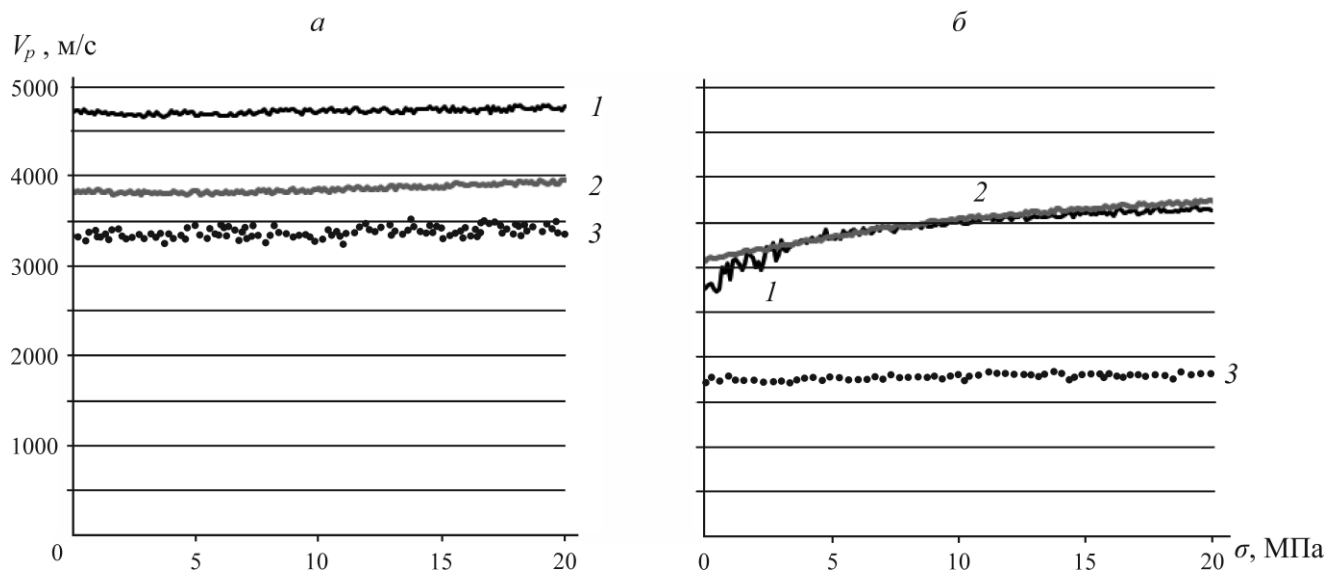


Рис. 5. Значения V_p в образцах при увеличении осевого напряжения σ до (а) и после (б) образования трещины: 1 — группа “ЖК”; 2 — группа “Г”; 3 — группа “Д”

Существенного изменения V_p в ненарушенных образцах не наблюдается (рис. 5а). Появление субгоризонтального нарушения сплошности приводит к значительному снижению скорости продольных волн во всех исследованных образцах (рис. 5б). Рост осевого давления повышает V_p за счет сближения берегов нарушения, при этом приращения скорости оказываются различными для пород разного генезиса. В диапазоне от 0 до 20 МПа рост V_p для группы “ЖК” составил 24.0 %, для группы “Д” — 2.5 %, для группы “Г” — 17.5 %. Различия в показателях в данном случае обусловлены исключительно контактными условиями на берегах нарушения. Твердость доломита в 2 раза ниже, чем у железистого кварцита и гранита (4 по шкале Мооса для доломита, 7 — для гранита и железистого кварцита). Однако из-за низкой твердости берега нарушения сплошности в образцах доломита смыкаются при малых нагрузках за счет частичного смятия выступов. Дальнейшее увеличение нагрузки не приводит к существенному изменению контактных условий. Можно утверждать, что твердость породы заметно влияет на зависимости $V_p(\sigma)$ в случае нахождения на базе прозвучивания нарушения сплошности.

В дополнение к скоростям первого вступления проведена оценка эффективной ширины спектра:

$$\Delta\omega_{ef} = \frac{1}{F_{\max}} \int_0^{+\infty} F(\omega) d\omega,$$

где $F(\omega)$ — амплитудный спектр сигнала; $F_{\max}$ — амплитуда спектрального максимума.

На рис. 6 представлены графики, полученные по результатам расчета $\Delta\omega_{ef}$. Для всех исследованных пород значения $\Delta\omega_{ef}$ колеблются в пределах 30–45 кГц. В образцах групп “Д” и “Г”, содержащих трещины, наблюдается увеличение ширины спектра сигнала на фоне смыкания берегов трещины в диапазоне осевого давления до 4 МПа. Показатель $\Delta\omega_{ef}$ нельзя считать информативным из-за значительного разброса значений (усредненное значение коэффициента вариации составляет 8.4 %).

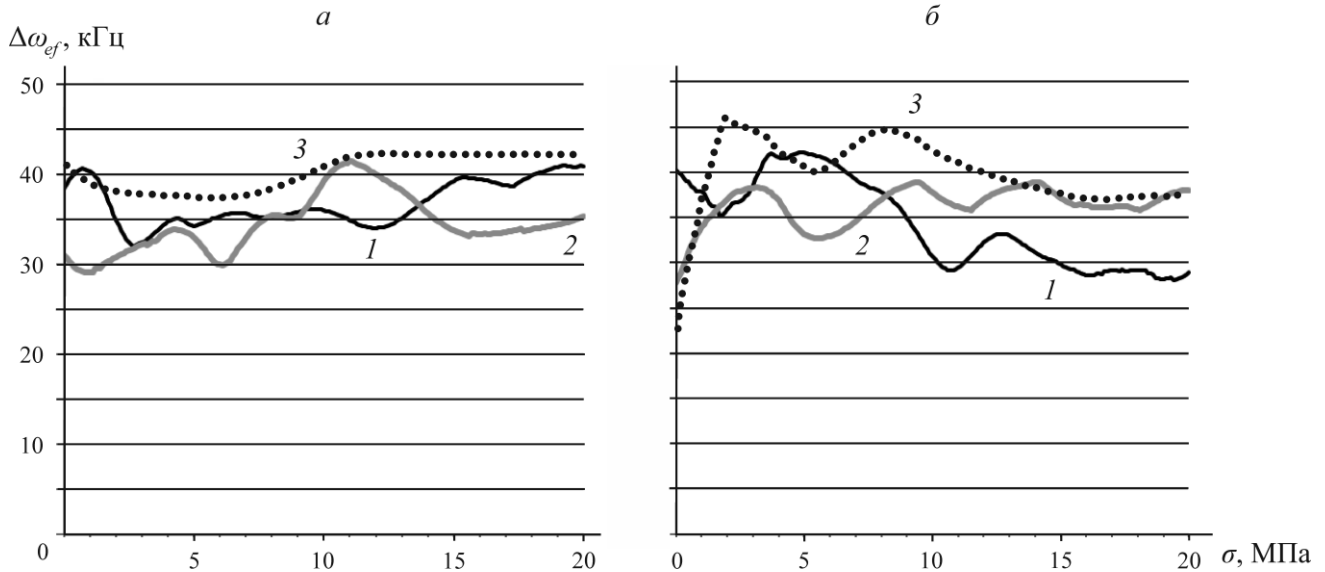


Рис. 6. Результаты расчета эффективной ширины спектра до (а) и после (б) образования трещины

Следующий этап обработки — реализация алгоритма CWI. Для вычисления значений dt использовался метод ST. В качестве волновой формы, описывающей начальное состояние образца, брался первый сигнал, зарегистрированный при $\sigma = 0$ МПа. Прямой переход от dt к истинным значениям скоростей многократно рассеянных волн не имеет физического обоснования, так как указанные волны из-за многократных переотражений и рассеяния проходят по более протяженному пути. В практике применения CWI обычно вычисляют отношение приращения скоростей dV за счет изменения dt к измеренным значениям V_p . Рост dV/V_p свидетельствует о снижении времени первых вступлений рассеянных волн, наблюдающихся в коде волны (рис. 7). Это связано с уплотнением образца под действием давления, смыканием микротрещин, пор, что, как следствие, приводит к сокращению количества переотражений сигнала.

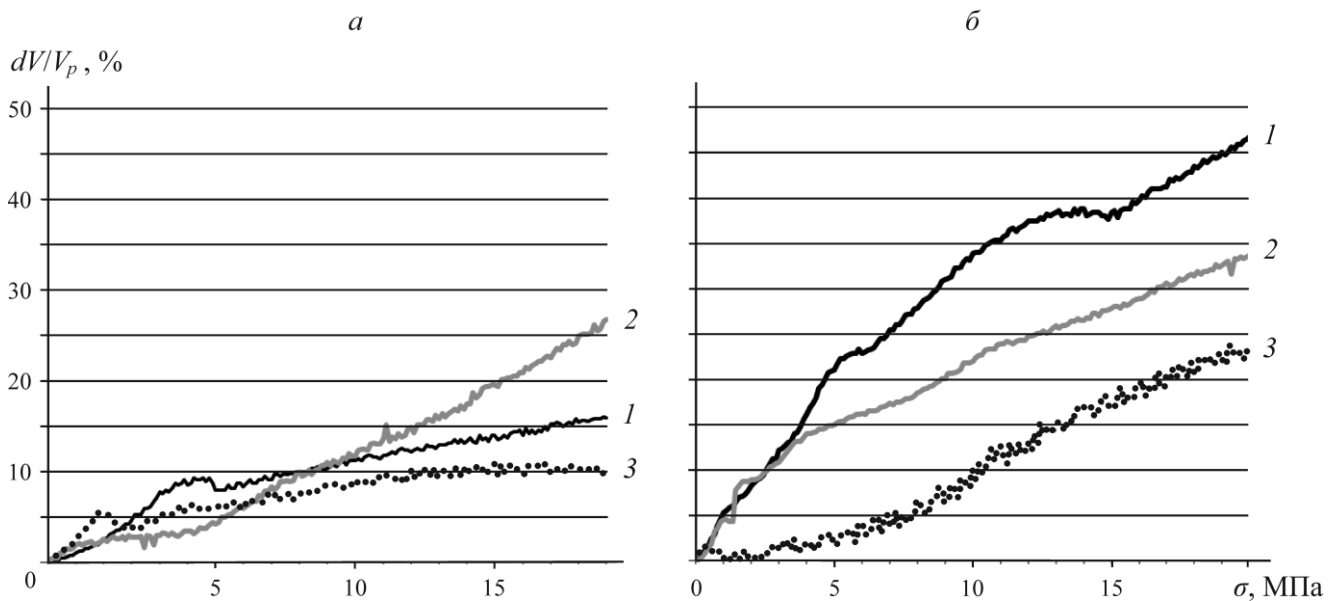


Рис. 7. Результаты расчета значений dV/V_p методом CWI для образцов до (а) и после (б) образования трещины

Из рис. 7а видно, что в отличие от измеренного ранее V_p для всех образцов характерен рост dV/V_p с увеличением осевого давления в случае отсутствия нарушения. Для образцов групп “ЖК” и “Г” зависимость $dV/V_p(\sigma)$ носит линейный характер, что хорошо согласуется с результатами, полученными на бетонах [25]. На образце группы “Д” наблюдается нелинейная зависимость, связанная с наличием пор в образцах доломита. При $\sigma = 0-15$ МПа отмечается постепенное закрытие пор, что отражается на значениях dV/V_p . После $\sigma = 15$ МПа возможности повышения dV/V_p оказываются исчерпанными.

Для образцов с нарушением сплошности рост dV/V_p более заметен (значительно превышает рост V_p). Очевидно, что происходит одновременное уплотнение образца, а также смыкание берегов нарушения.

Использование алгоритма CWI не подходит для определения абсолютных значений напряжений в породном массиве, так как предполагает сравнение сигналов в породах до и после определенного воздействия. Однако использование указанного алгоритма может значительно повысить чувствительность ультразвукового контроля изменения напряженно-деформированного состояния. Например, предлагается использовать алгоритм CWI для обработки каротажных измерений в вертикальной скважине, проводимых в режиме дискретного мониторинга (регулярных измерений по мере удаления забоя от зоны контроля). В этом случае выполняется серия первичных регистраций волновых форм в фиксированных точках на разной глубине вертикальной измерительной скважины, пробуренной в кровле выработки. Результаты последующих измерений, проводимых через равные интервалы времени в тех же точках, сравниваются с исходными волновыми формами. Переход от кинематических характеристик к абсолютным значениям приращений напряжений осуществляется по тарифовочным кривым, получаемым на образцах в лабораторных условиях согласно описанной здесь методике. При нахождении нарушения сплошности на базе прозвучивания используются тарифовочные зависимости, которые наблюдаются на образцах, также содержащих нарушение. Наибольшая эффективность указанного способа будет проявляться при определении малых по амплитуде и продолжительных по времени изменений напряженно-деформированного состояния массива.

ВЫВОДЫ

Одноосное нагружение ненарушенных образцов до уровня 20 МПа не вызывает вариации времен первого вступления продольных волн при боковом прозвучивании. Заметное изменение V_p происходит только при наличии в них нарушения сплошности. Существенного изменения ширины спектра акустических колебаний с ростом осевой нагрузки также не наблюдается.

В результате обработки сигналов с помощью алгоритма интерферометрии на кодах волн установлено, что повышение напряжений приводит к практически линейному росту приращений скорости многократно рассеянных волн в ненарушенных образцах. В образцах с нарушением сплошности изменение скоростей рассеянных волн оказывается еще более значительным, в том числе превышающим изменение V_p . Применение алгоритма интерферометрии на кодах волн позволяет проводить оценку изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива, используя исключительно кинематические характеристики ультразвуковых сигналов. Полученные данные могут лечь в основу совершенствования методов акустиче-

ского каротажа приконтурного массива пород в случаях, когда использование динамических и спектральных критериев невозможно из-за применения сухого контакта на границе “преобразователь – порода”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Winkler K. W. and Liu X.** Measurements of third-order elastic constants in rocks, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1996, Vol. 100, No. 3. — P. 1392–1398.
2. **Johnson P. A. and Rasolofosaon P. N. J.** Nonlinear elasticity and stress induced anisotropy in rock, *J. Geophys. Res.*, 1996, Vol. 101, No. B2. — P. 3113–3124.
3. **Kusznir N. J. and Whitworth K. R.** Use of synthetic fracture logs derived from borehole geophysics to assess mine roof and floor quality, *Int. J. Min. Eng.*, 1983, Vol. 1, No. 3. — P. 253–260.
4. **Nazarov L. A.** Determination of properties of structured rock mass by the acoustic method, *J. Min. Sci.*, 1999, Vol. 35, No. 3. — P. 240–249.
5. **Oyler D. C., Mark C., and Molinda G. M.** In situ estimation of roof rock strength using sonic logging, *Int. J. Coal Geol.*, 2010, Vol. 83, No. 4. — P. 484–490.
6. **Shkuratnik V. L. and Danilov G. V.** Investigation into the influence of stresses on the velocities of elastic waves in the vicinity of an elliptical mine working, *J. Min. Sci.*, 2005, Vol. 41, No. 5. — P. 195–201.
7. **Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е.** Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 48–53.
8. **Ржевский В. В., Ямщиков В. С.** Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. — М.: Наука, 1973. — 224 с.
9. **Chakravarty A., Misra S., and Rai C. S.** Visualization of hydraulic fracture using physics-informed clustering to process ultrasonic shear waves, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2021, Vol. 137. — 104568.
10. **Santos C. A., Urdaneta V., Jaimes G., and Trujillo L.** Ultrasonic spectral and complexity measurements on brine and oil saturated rocks, *Rock Mech. Rock Eng.*, 2010, Vol. 43, No. 3. — P. 351–359.
11. **Shamina O. G. and Palenov A. M.** Elastic wave spectra and fracture, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2000, Vol. 36, No. 3. — P. 196–203.
12. **Николенко П. В., Зайцев М. Г.** Оценка шероховатости поверхности и идентификация типа горных пород ультразвуковыми и оптическими методами // ГИАБ. — 2022. — № 3. — С. 5–15.
13. **Nur A.** Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks, *J. Geophys. Res.*, 1971, Vol. 76. — P. 2022–2032.
14. **Nur A. and Simmons G.** Stress-induced velocity anisotropy in rocks, an experimental study, *J. Geophys. Res.*, 1969, Vol. 74. — P. 6667–6676.
15. **Туранк К., Фурментро Д., Денни А.** Распространение волн и границы раздела в породах // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. — М.: Мир, 1994. — С. 176–184.
16. **Roberts P. M., Phillips W. S., and Fehler M.** Development of the active doublet method for measuring small velocity and attenuation changes in solids, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1992, Vol. 91, No. 6. — P. 3291–3302.
17. **Grêt A., Snieder R., and Scales J.** Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry, *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111. — B03305.
18. **Pacheco C. and Snieder R.** Time-lapse travel time change of multiply scattered acoustic waves, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, Vol. 118, No. 3. — P. 1300–1310.

19. **Stähler S. C., Sens-Schönfelder C., and Niederleithinger E.** Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry, *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, Vol. 129, No. 4. — P. 1945–1952.
20. **Lobkis O. I. and Weaver R. L.** Coda-wave interferometry in finite solids: Recovery of P-to-S conversion rates in an elastodynamic billiard. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, Vol. 90. — P. 1–4.
21. **Jiang H., Zhang J., and Jiang R.** Stress evaluation for rocks and structural concrete members through ultrasonic wave analysis: Review. *J. Mater. Civil Eng.*, 2017, Vol. 29, No. 10. — 04017172.
22. **Niederleithinger E., Sens-Schönfelder C., Grothe S., and Wiggenger H.** Coda wave interferometry used to localize compressional load effects in a concrete specimen, 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2014, 2nd European Conf. Prognostics and Health Management (PHM) Society, 2014. — P. 1427–1433.
23. **Wang X., Chakraborty J., Bassil A., and Niederleithinger E.** Detection of multiple cracks in four-point bending tests using the coda wave interferometry method, *Sensors (Switzerland)*, 2020, Vol. 20, No. 7.
24. **Niederleithinger E. and Wunderlich C.** Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete, *AIP Conf. Proc.*, 2013, Vol. 1511. — P. 390–397.
25. **Larose E. and Hall S.** Monitoring stress related velocity variation in concrete with a $2 \cdot 10^{-5}$ relative resolution using diffuse ultrasound (L), *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009, Vol. 125, No. 4. — P. 1853–1856.
26. **Wiggenger H. and Niederleithinger E.** Innovative ultrasonic techniques for inspection and monitoring of large concrete structures, *EPJ Web of Conf.*, 2013, Vol. 56. — 04004.
27. **Wang X., Niederleithinger E., and Hindersmann I.** The installation of embedded ultrasonic transducers inside a bridge to monitor temperature and load influence using coda wave interferometry technique, *Structural Health Monitoring*, 2022, Vol. 21, No. 3. — P. 913–927.
28. **Zhang Y., Larose E., Moreau L., and d'Ozouville G.** Three-dimensional in-situ imaging of cracks in concrete using diffuse ultrasound, *Structural Health Monitoring*, 2018, Vol. 17, No. 2. — P. 279–284.

Поступила в редакцию 30/IX 2022

После доработки 25/X 2022

Принята к публикации 24/XI 2022