

УДК 621.3.08 + 622

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ
И ГЕНЕРАЦИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НАГРУЖЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. И. Востриков, В. Ф. Захариков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: vvi.49@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Проведено экспериментальное исследование распространения упругих колебаний при сжатии на прессе и ударных воздействиях образцов горных пород до разрушения. При ударном воздействии на образец регистрировался сигнал ускорения и рассчитывалась спектральная плотность, на основании которой определялись скорости упругих колебаний. Установлено, что при увеличении нагрузки до предразрушающего значения происходит увеличение скорости продольных и поперечных колебаний, причем скорость распространения поперечных колебаний возрастает более чем на 50 %. Расчет акустической добротности демонстрирует увеличение этого параметра на 70 %. Энергия микросейсмической эмиссии при предразрушающих нагрузках в 2 раза превышает энергию при малых нагрузках, при этом генерируются значительные по амплитуде спектральные составляющие, свидетельствующие об образовании крупных отдельностей.

Продольные и поперечные волны, измерительный стенд, смещение, деформация, лазерные датчики, резонансная частота, скорость упругих колебаний, микросейсмическая эмиссия

DOI: 10.15372/FTPRPI20240104
EDN: IQGVPH

В механике горных пород широко распространено определение физико-механических (деформационно-прочностных) свойств образцов горных пород неразрушающими методами воздействия путем исследования в них распространения упругих волн. Большинство работ в этой области посвящено установлению корреляционных зависимостей между параметрами ультразвуковых сигналов: скоростями распространения, затухания, частотными спектрами, плотностью, трещиноватостью, текстурой горных пород, напряженно-деформированным состоянием и т. д.

Лабораторные эксперименты проводились при различных видах нагружения: с помощью одноосного сжатия, в камере объемного сжатия, при высоких и низких значениях температур, при боковом давлении, а также при насыщении пород флюидом [1 – 3].

В [4 – 8] отмечалась перспективность использования поперечных упругих волн благодаря их высокой чувствительности к структуре материала и трещинообразованию в процессе нагружения образца горной породы, рассматривались особенности постановки эксперимента, приборы, результаты лабораторных исследований.

Генерации сигналов микросейсмической эмиссии и их изменение, а также температурное поле исследовались на образцах горных пород [9].

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ И ВЫДЕЛЕНИЕ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ОБРАЗЦАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Исследовались особенности распространения собственных упругих колебаний, продольных и поперечных, в образцах горной породы, зависимости их характеристик (скорости, затухания, спектрального состава) от напряженно-деформированного состояния.

Для проведения исследований разработан измерительный стенд, внешний вид которого представлен на рис. 1.

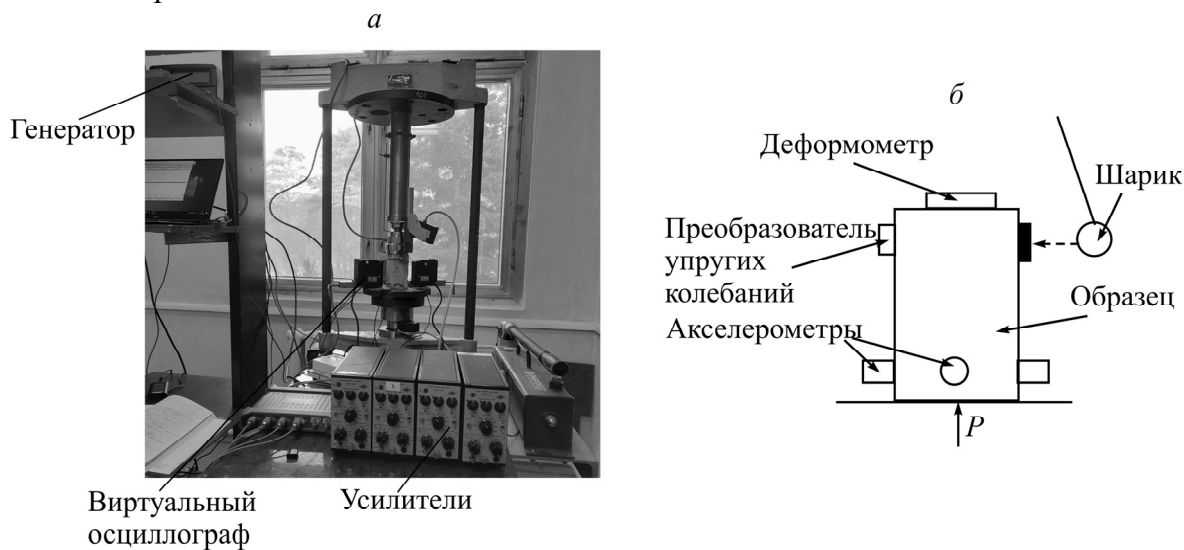


Рис. 1. Общий вид стенда (а), схема ударного воздействия (б)

Стенд позволяет нагружать образцы горной породы одноосным сжатием в вертикальном направлении до максимальной нагрузки 50 кН. Он оснащен лазерными датчиками: одним — для регистрации вертикальных деформаций и двумя — для горизонтальных деформаций в противоположных направлениях. Для регистрации упругих колебаний и микросейсмической эмиссии применяются акселерометры KD91, укрепленные на боковых гранях в нижней части образца.

Возбуждение упругих колебаний, продольных и поперечных, осуществляется ударом стального шарика массой 9 г по верхней части боковой грани. Энергия удара составляет 0.35 мДж, при этом в образце возбуждаются упругие колебания поперечного типа и продольные волны.

Для анализа влияния контактных условий при изменении нагрузки проведен эксперимент на образце из стали $50 \times 50 \times 100$ мм. Выполнены прямые измерения продольных и поперечных скоростей и рассчитаны резонансные частоты по формуле

$$f = \frac{V}{2l}. \quad (1)$$

Исследованы зависимости резонансных частот упругих колебаний от динамического воздействия по схеме рис. 1б при изменении вертикальной нагрузки. Результаты представлены в табл. 1.

Показана независимость характеристик упругих колебаний при динамических воздействиях в жестких контактных условиях между торцами модели и прессом.

ТАБЛИЦА 1. Значения резонансных частот упругих колебаний в зависимости от нагрузки, кГц

Нагрузка, кН	Частота колебаний	
	продольных $f_{\text{пр}}$	поперечных $f_{\text{поп}}$
0.1	30.20	17.60
25	31.80	17.10
30	31.70	17.09
40	31.78	18.00
45	31.23	17.08
50	31.80	18.20

Для проведения исследований на горной породе изготовлены образцы прямоугольной формы размером $100 \times 50 \times 50$ мм из алевролита. Предварительно на них измерены скорости упругих колебаний V и рассчитаны резонансные частоты f . Средние значения продольных колебаний: $V_{\text{пр}} = 3205$ км/с, $f_{\text{пр}} = 16020$ кГц; поперечных колебаний: $V_{\text{поп}} = 1859$ км/с, $f_{\text{поп}} = 9295$ кГц. Расчет резонансных частот осуществлялся по (1).

Исследование распространения упругих колебаний при динамическом воздействии проводилось при десяти ступенях нагрузки на образец от 0 до 47 кН. На рис. 2 приведены записи аналоговых сигналов ускорения \ddot{a} и их спектральные плотности ускорения (СПУ) S для двух значений нагрузки 0 и 47 кН.

Анализ аналоговых записей (рис. 2а, в) показывает, что при одной и той же энергии удара энергия сигнала, регистрируемая акселерометром, при нагрузке на образец 47 кН существенно больше, чем без нагрузки. Спектральная плотность ускорения при нагрузке 47 кН (рис. 2г) фиксирует значительные величины спектральных составляющих.

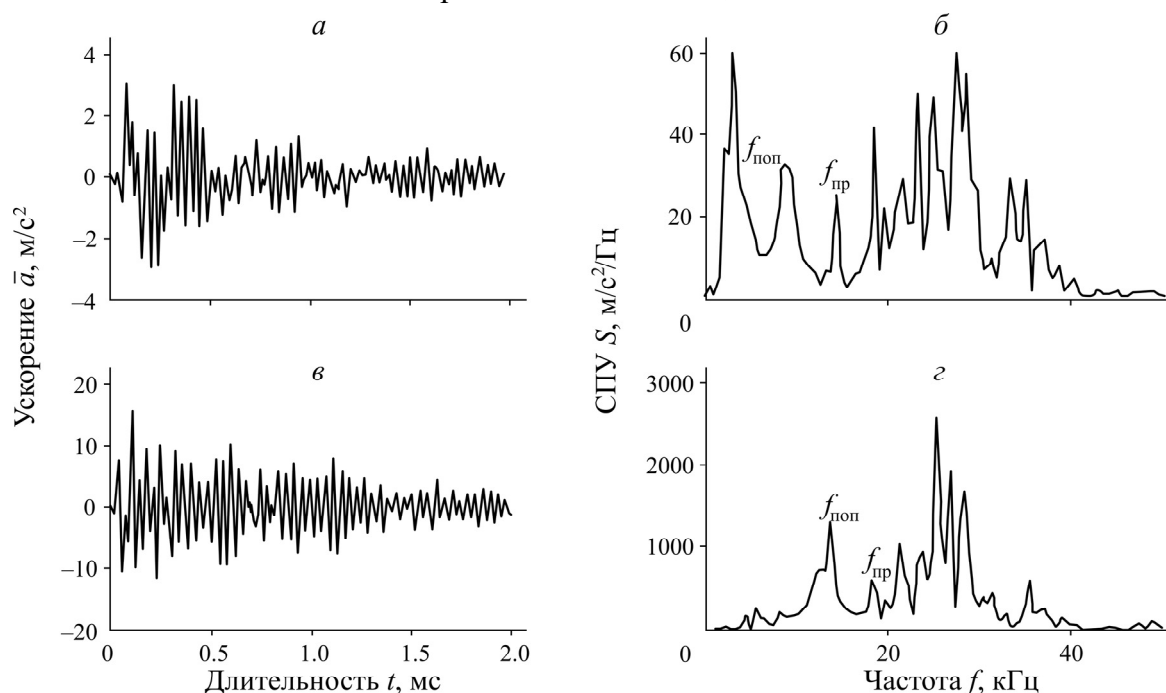


Рис. 2. Упругие колебания (а, в) и их спектры (б, г) при изменении нагрузки на образец: а, б — 0 кН; в, г — 47 кН

На рис. 2б, г представлены частотные составляющие $f_{\text{пр}}$, $f_{\text{поп}}$ соответственно для продольных и поперечных упругих колебаний без нагрузки и для 47 кН (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Значения частот и скоростей упругих колебаний от нагрузки

Упругие колебания	Нагрузка, кН	Частота f , кГц	Скорость V , км/с
Продольные	0	15.4	3.10
	47	18.3	3.66
Поперечные	0	9.0	1.80
	47	13.7	2.76

Аналоговые записи ускорения показывают, что увеличение вертикальной нагрузки приводит к существенному увеличению энергии генерируемого сигнала, что характеризует увеличение плотности образца.

На рис. 3 приведены изменения размеров образца в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Вертикальный размер образца уменьшился на 0.5 мм в результате уплотнения (рис. 3а). В горизонтальной плоскости размер образца увеличился на 0.04 мм, причем это изменение зарегистрировано с одной стороны образца. Дальнейшее увеличение нагрузки P свыше 47 кН привело к разрушению образца.

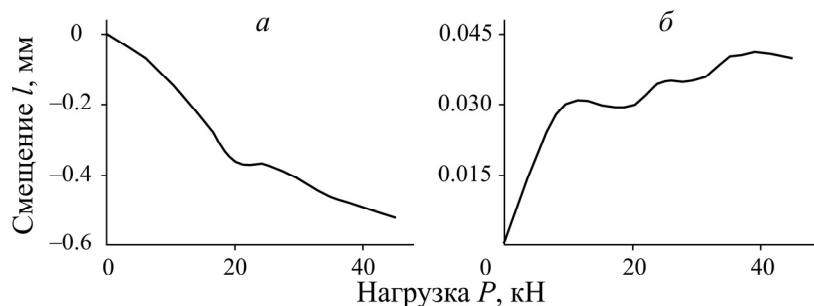


Рис. 3. Изменение размеров образца в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях

Для всех ступеней вертикальной нагрузки на образец от 0 до 47 кН динамического воздействия обработаны сигналы и по полученным резонансным составляющим $f_{пр}$, $f_{поп}$ вычислены скорости для продольных и поперечных колебаний $V_{пр}$, $V_{поп}$ (рис. 4).

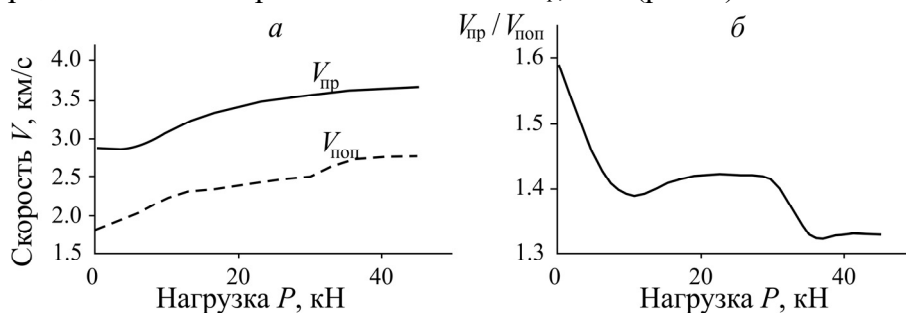


Рис. 4. Зависимости скоростей продольных и поперечных колебаний (а) и отношения скоростей (б) от нагрузки

При изменении нагрузки в диапазоне 0–47 кН скорость продольных колебаний увеличивается от 2.86 до 3.66 км/с, что составляет 45 % изменения, а скорость поперечных колебаний — от 1.8 до 2.76 км/с, изменение равно 53 %. Следовательно, поперечные колебания более чувствительны к напряженно-деформированному состоянию.

Определим акустическую добротность горной породы для данной серии образцов. Существует несколько методов определения добротности [10, 11]: через пространственное затухание, фиксируемое в двух точках образца; путем измерения коэффициента затухания в одной точке, возбуждаемого ударом; измерения резонансной частоты и ширины полосы пропускания

вблизи резонанса при прозвучивании образца гармоническим сигналом. Анализ спектральных составляющих относится к резонансным методам определения физико-механических свойств горной породы. В данном исследовании воспользуемся этим методом.

В верхней части стенда укрепляется преобразователь упругих колебаний, на который подается сигнал от генератора синусоидальных колебаний. Перестраивая частоту вблизи резонанса f_p , определяем f_v и f_n — соответственно верхнюю и нижнюю частоты полосы пропускания сигнала по уровню 0.7 от максимального значения амплитуды при резонансе. Измерения выполняются для поперечных колебаний.

Для нагрузки 0 кН $f_{\text{поп}} = 9.0$ кГц и $f_v - f_n$ составляет ~ 900 Гц, для нагрузки 47 кН $f_{\text{поп}} = 13.7$ кГц и $f_v - f_n$ составляет ~ 800 Гц. По методике, изложенной в [10], рассчитаем акустическую добротность Q образца горной породы:

$$Q = \frac{f_p}{f_v - f_n} \quad (2)$$

Находим соответственно $Q_0 = 10$ и $Q_{47} = 17.1$. Относительное изменение составляет более 70%. Полученные результаты относительных зависимостей изменения скоростей упругих колебаний и акустической добротности при изменении нагрузки от 0 до 47 кН сведем в список: для продольных — 45%; для поперечных — 53%; для акустической добротности — 71%.

Таким образом, акустическая добротность Q является более чувствительной характеристикой к изменению напряженно-деформированного состояния образцов горной породы.

ВЫДЕЛЕНИЕ АККУМУЛИРОВАННОЙ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОБРАЗЕЦ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Отдельно проведены эксперименты по регистрации микросейсмической эмиссии при действии вертикальной нагрузки на такие же образцы, что и в предыдущем эксперименте.

Сигналы микросейсмической эмиссии начали генерироваться при нагрузке 32 кН и далее регистрировались по мере увеличения нагрузки до предельной 47 кН. Затем образец разрушался. На рис. 5 приведены сигналы эмиссии при крайних значениях нагрузки: на рис. 5а показан сигнал, непосредственно записанный перед разрушением образца.

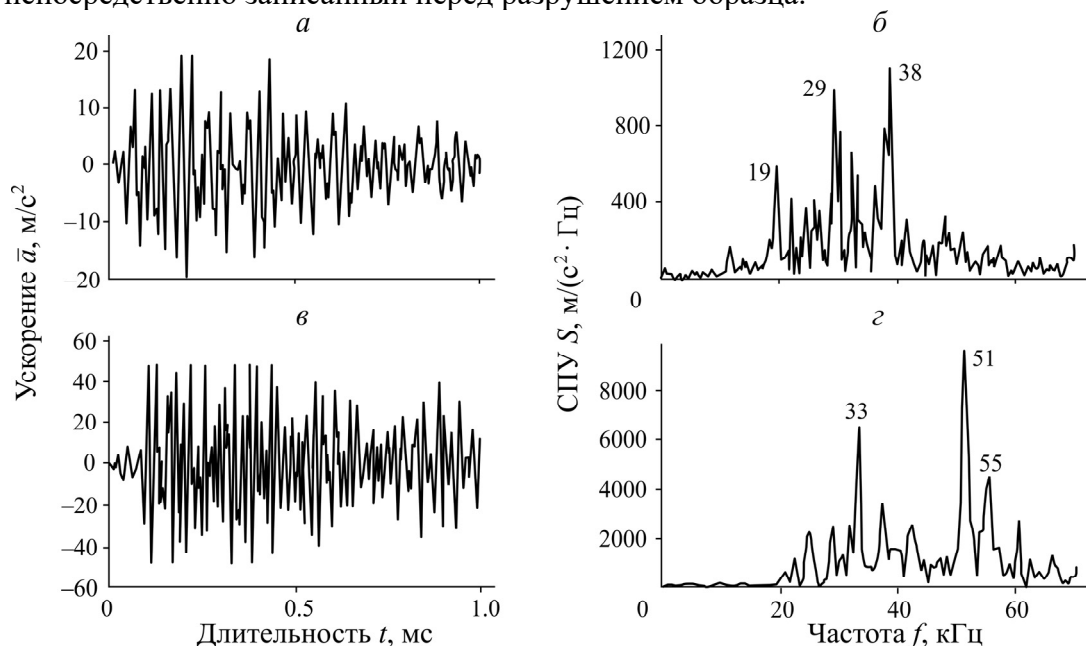


Рис. 5. Диаграммы микросейсмической эмиссии при нагрузках 32 кН (а, б) и 47 кН (в, г)

Сравнивая амплитуды аналоговых сигналов и спектральных составляющих (рис. 5), можно отметить значительное увеличение выделяемой энергии при нагрузке 47 кН, чем при нагрузке 32 кН.

Следует заметить, что если при нагрузке 32 кН спектр сигнала насыщен мелкими по амплитуде составляющими, что характеризует генерацию мелких трещин и мелких кластеров, то при 47 кН выделяются две значительные по амплитуде составляющие, которые показывают формирование крупных кластеров в образце. Таким образом образец “подготовился” к разрушению на крупные отдельные.

Следующий этап исследований — выявление связи ударного воздействия с последующей генерацией микросейсмической эмиссии на напряженный образец горной породы. Образец нагружали до разрушения при ~ 50 кН. Одновременно проводили динамическое воздействие с энергией 0.35 мДж по боковой грани. Результаты показали, что этого значения энергии ударного воздействия для генерации микросейсмической эмиссии явно недостаточно.

Энергию ударного воздействия увеличили до 0.5 мДж (рис. 6). Сигнал зарегистрирован при нагрузке ~ 45 кН. На аналоговой записи сигнала (рис. 6а) четко выделяется начальная ударная часть до 0.8 мс. Затем на ударный сигнал накладывается сигнал эмиссии, который вызван действием этого удара, что и привело к разрушению образца. Напряженное состояние образца достигло предельного значения, и ударный импульс послужил спусковым крючком для высвобождения аккумулированной микросейсмической энергии.

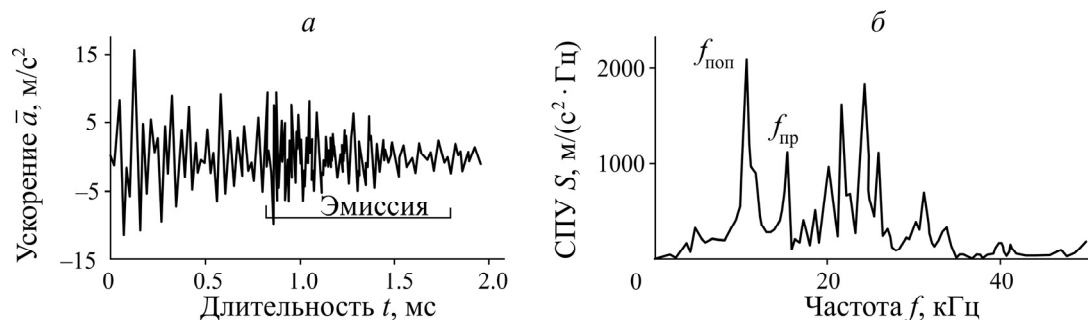


Рис. 6. Ударное воздействие с выделением микросейсмической эмиссии (а) и ее спектральная плотность (б)

На диаграмме спектральной плотности (рис. 6б) выделяются две области: первая 4–16 кГц соответствует ударному сигналу. Здесь четко выделяются частотные составляющие поперечных колебаний $f_{\text{поп}} = 10.7$ кГц и продольных $f_{\text{пр}} = 16.4$ кГц. Вторая область 18–36 кГц соответствует сигналу микросейсмической эмиссии, где выделяются частотные составляющие $\sim 22, 24$ и 26 кГц.

ВЫВОДЫ

Исследовано распространение собственных упругих колебаний в напряженных образцах горной породы при динамических воздействиях. Выявлено, что при изменении нагрузки на образец от 0 до 47 кН происходит увеличение скорости распространения продольных и поперечных колебаний соответственно на 45 и 53 %, т. е. поперечные колебания чувствительны к изменению нагрузки на образец. Расчет акустической добротности в том же диапазоне изменения нагрузки демонстрирует увеличение этого параметра более чем на 70 %. Таким образом, акустическая добротность более чувствительна к изменению напряженно-деформированного состояния.

Анализ параметров микросейсмической эмиссии под действием одноосной нагрузки на образец горной породы показал, что в предразрушающем состоянии энергия акустического излучения более чем в 2 раза превышает энергию при малых нагрузках. Амплитуда отдельных спектральных составляющих превышает среднюю амплитуду сигнала эмиссии при малых

нагрузках почти на порядок. При малых нагрузках на образец спектр сигнала микросейсмической эмиссии насыщен мелкими по амплитуде спектральными составляющими, что характерно для образования мелких трещин. Предразрушающая нагрузка генерирует сигнал, в спектре которого выделяются значительные по амплитуде частотные составляющие, которые формируют крупные отдельности, т. е. образец уже разрушился, но еще сохраняет целостность.

Исследована взаимосвязь динамического воздействия на образец горной породы в напряженном состоянии и высвобождения аккумулированной энергии в виде микросейсмического излучения. Установлено, что динамическое воздействие на образец, находящийся под статической нагрузкой в предразрушенном состоянии, служит спусковым крючком для высвобождения энергии и приводит к разрушению образца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wei X., Wang S. X., Zhao J. G., and Deng J. X. Laboratory investigation of influence factors on V_p and V_s in tight sandstone, *Geoph. Prosp. Petroleum*, 2015, Vol. 54, No. 1. — P. 9–16.
2. Wei X., Wang S. X., Zhao J. G., Tang G. Y., and Deng J. X. Laboratory study of velocity of the seismic wave in fluid-saturated sandstones, *Chinese J. Geophysics*, 2015, Vol. 58, No. 9. — P. 330–338.
3. Zhou Z. G., Zhu H. H., and Chen W. Experimental study on acoustic wave propagation character of water saturated rock samples, *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 2006, Vol. 25. — P. 911–917.
4. Xu X. L., Zhang R., Dai F., Yu B., Gao M. Z., and Zhang Y. F. Effect of coal and rock characteristics on ultrasonic velocity, *Meitan Xuebao, J. China Coal Society*, 2015, Vol. 40, No. 4. — P. 793–800.
5. Zeroug S., Sinha B. K., Lei T., and Jeffers J. Rock heterogeneity at the centimeter scale, proxies for interfacial weakness, and rock strength-stress interplay from downhole ultrasonic measurements, *Geophysics*, 2018, Vol. 83, No. 3. — P. D83–D95.
6. Dambly M. L. T., Nejati M., Vogler D., and Saar M. O. On the direct measurement of shear moduli in transversely isotropic rocks using the uniaxial compression test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2019, Vol. 113. — P. 220–240.
7. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Ануфренкова П. С. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных упругих волн // ГИАБ. — 2020. — № 4. — С. 117–126.
8. Nikolenko P. V., Epshtein S. A., Shkuratnik P. S., and Anufrenkova V. L. Experimental study of coal fracture dynamics under the influence of cyclic freezing–thawing using shear elastic waves, *Int. J. Coal. Sci. Technol.*, 2021, Vol. 8, No. 4. — P. 562–574.
9. Востриков В. И., Усольцева О. М., Цой П. А. Эволюция сигналов микросейсмической эмиссии и температурного поля при нагружении призматических образцов аргиллита с отверстием в центре // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2021. — Т. 8. — № 1. — С. 296–301.
10. Куткин Я. О. Обоснование методики определения взаимозависимостей акустической добротности и прочности горных пород // ГИАБ. — 2014. — № 6.
11. Востриков В. И., Цой П. А., Усольцева О. М. Акустические характеристики образцов горных пород при воздействии отрицательных температур // ФТПРПИ. — 2023. — № 3. — С. 192–200.

Поступила в редакцию 17/1 2024

После доработки 23/1 2024

Принята к публикации 24/1 2024