

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ УГЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОПЕРЕЧНЫХ УПРУГИХ ВОЛН

В.Л. Шкуратник¹, П.В. Николенко¹, П.С. Ануфренкова¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: ftkp@mail.ru

Аннотация: Применение поперечных упругих волн ультразвукового диапазона частот при исследовании структуры и свойств горных пород позволяет повысить чувствительность контроля, а также дает возможность оценивать анизотропию геоматериала и выявлять в нем определенным образом ориентированные дефекты. Однако по сравнению с традиционно используемыми продольными волнами, применение сдвиговых волн связано с рядом сложностей, как на этапе их генерации, так и на этапах их ввода в контролируемую среду и приема из нее. Особенно это актуально при работе с хрупкими, пористыми и трещиноватыми породами с большим затуханием упругих волн, в частности, такими, как уголь. Лабораторные исследования проводились на образцах антрацита, каменного и бурого углей. Показано, что использование высоковязких жидких контактных сред, например меда, позволяет устойчиво регистрировать сдвиговые колебания в образцах углей. Однако многократное применение таких сред приводит к их проникновению в приповерхностный слой образца и постепенному изменению его акустических свойств и поврежденности. Предложено использовать для ввода поперечных волн в объект контроля и приема из него наждачную бумагу различной зернистости, которая приклеивается на протектор акустического преобразователя или сама является протектором. Для различных типов углей установлены оптимальные, обеспечивающие максимальное отношение сигнал/помеха значения зернистости наждачной бумаги. Показано, что ее применение в качестве контактной среды при многократных измерениях не снижает качества акустического контакта и не влияет на результаты ультразвуковых исследований.

Ключевые слова: ультразвуковые измерения, поперечная волна, антрацит, каменный и бурый уголь, свойства, контактные условия, контроль.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, соглашение № 18-05-70002.

Для цитирования: Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Ануфренкова П.С. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных упругих волн // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 117–126. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-117-126.

About features of ultrasonic measurements in coal samples using shear elastic waves

V.L. Skuratnik¹, P.V. Nikolenko¹, P.S. Anufrenkova¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: ftkp@mail.ru

Abstract: The use of shear elastic waves of the ultrasonic frequency range in the study of the structure and properties of rocks makes it possible to increase the sensitivity of control, and also allows to evaluate the anisotropy of the geomaterial and to identify oriented defects in it. However, in comparison with traditionally used longitudinal waves, the use of shear waves is associated with a number of difficulties, both at the stage of their generation and at the stages of their introduction into the controlled medium and reception from it. This is especially true when working with brittle, porous and fractured rocks with large attenuation of elastic waves, such as coal. Laboratory studies were conducted on samples of anthracite, hard coal and lignite. It is shown that the use of highly viscous liquid contact media, such as honey, allows one to stably register shear waves in coal samples. However, repeated use of such media leads to their penetration into the surface layer of the sample and a gradual change in its acoustic properties and damage degree. It is proposed to use sandpaper of various grain sizes to introduce and receive the shear waves into and from controlled object. Sandpaper is glued to the protector of the acoustic transducer. For various types of coals, optimal grit sizes of sandpaper have been established providing the maximum signal/noise ratio. It is shown that use of such contact medium during repeated measurements does not reduce the quality of acoustic contact and does not affect the results of ultrasonic studies.

Key words: ultrasonic measurements, shear wave, anthracite, hard coal, lignite, properties, contact conditions.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, No. 18-05-70002.

For citation: Skuratnik V. L., Nikolenko P. V., Anufrenkova P. S. About features of ultrasonic measurements in coal samples using shear elastic waves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(4):117-126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-117-126.

Ведение

Получение информации о физико-механических свойствах горных пород осуществляется сегодня преимущественно с использованием лабораторных исследований на образцах. При этом реализуются два принципиально разных подхода. В рамках первого из них измеряют деформации образцов в процессе их механического нагружения [1]. В рамках второго подхода проводят ультразвуковые (УЗ) измерения с использованием различных типов упругих волн, видов сигналов и их информативных параметров, позволяющих определить искомые свойства геоматериала на основе соответствующих функциональных или корреляционных зависимостей [2–7].

Каждый из указанных выше подходов имеет свои достоинства, недостатки

и ограничения. Так, поскольку прямые деформационные измерения проводятся на поверхности образца, то они не полностью отражают процессы деформирования и разрушения, происходящие в его объеме. Кроме того, эти измерения достаточно трудоемки и по сути являются разрушающими.

При УЗ измерениях, в отличие от прямых механических испытаний, извлечение искомой информации об объекте контроля (ОК) осуществляется с помощью взаимодействующего с ним низкоэнергетического волнового процесса, не влияющего на свойства исследуемого геоматериала. При этом получаемая информация носит интегральный характер и характеризует свойства этого материала, усредненные по всему объему образца.

Наиболее полно возможности УЗ методов исследования геоматериалов реализуются при использовании не только продольных (P), но и других типов упругих волн, прежде всего поперечных (S). По измеренным скоростям их распространения V_p и V_s можно определить скорости всех типов волн и динамические упругие модули геоматериала. Кроме того, поскольку для длин S и P волн всегда выполняется соотношение $\lambda_s < \lambda_p$, то S волны (прежде всего, их амплитудные и спектральные информативные параметры) более чувствительны к структурным элементам и трещиновидным дефектам геосреды, особенно если они ориентированы перпендикулярно вектору поляризации сдвиговых колебаний.

Благодаря такой чувствительности, использование S волн (особенно их динамических информативных параметров) оказывается чрезвычайно перспективным для оценки анизотропии геоматериалов и динамики их нарушенности под влиянием факторов различной физической природы [8–10].

Задача возбуждения и приема продольных упругих волн в важном для исследования на образцах горных пород диапазоне частот решается сегодня с использованием относительно простых и эффективных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) типа «продольный вибратор» [11]. В то же время, соответствующая задача для поперечных волн является более сложной. Первоначально она решалась на основе использования ПЭП с поперечно поляризованной пьезокерамикой. Однако они не нашли широкого применения, так как в диапазоне частот 200–600 кГц не обеспечивали необходимое соотношение «сигнал-помеха» относительно продольных колебаний и высокочастотных паразитных составляющих [12]. Более эффективным оказался подход, при котором пьезоэле-

мент излучает P -волну в звукопровод, состоящий из двух частей с различными волновыми сопротивлениями. Причем граница раздела между указанными частями находится под таким углом к падающей P -волне, при котором реализуется ее эффективная трансформация в S волну, распространяющуюся ортогонально поверхности объекта контроля (ОК) [13, 14].

Сам ввод сдвиговых колебаний в ОК также представляет определенную проблему, которая решается обычно либо приклеиванием рабочей поверхности ПЭП к поверхности ввода УЗ сигнала в образец, либо использованием вязкой контактной среды, размещаемой между протектором ПЭП и поверхностью ввода УЗ сигнала в образец. Например, в [14] показана эффективность использования в качестве такой среды высоковязкого раствора некристаллизующихся полисахаридов. Следует иметь в виду, что упомянутая контактная среда использовалась преимущественно для УЗ контроля образцов скальных и полускальных пород с относительно низкой пористостью и значительной прочностью. Это позволяло реализовать высокое и стабильное в процессе всего цикла измерений прижимное давление ПЭП к ОК, которое обеспечивало минимизацию потерь и изменений акустической мощности в контактных слоях, а значит и связанные с ними аддитивные и мультипликативные помехи в акустическом тракте. Соответствующий опыт обеспечения контактных условий ПЭП S -волн с образцами угля на сегодня отсутствует.

В связи с этим в рамках настоящей работы анализируются помеховые факторы, оказывающие влияние на излучение и прием S -волн в образцы угля, и рассматриваются некоторые технические решения, позволяющие минимизировать указанное влияние.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на образцах антрацита, каменного и бурого углей, представляющих месторождения Восточного Донбасса, Бородинское и Апсатское, соответственно. Цилиндрические образцы, полученные методом сухого шлифования, имели высоту 20 мм и диаметр 40 мм. Полученные предварительно усредненные значения предела прочности при сжатии составляли для антрацита – $\sigma_c = 22$ МПа, для каменного угля – $\sigma_c = 15,2$ МПа, для бурого угля – $\sigma_c = 12$ МПа.

Для проведения УЗ измерений был использован представленный на рис. 1 лабораторный стенд, основу которого составлял разработанный Ф.Ф. Горбачевичем акустополярископ (АП) [15]. Последний представляет собой устройство, содержащее излучающий и приемный УЗ преобразователи S-волн с рабочей частотой 600 кГц, закрепленные на специальной раме так, чтобы ориентация плоскостей их поляризации совпадала. Принципиальной особенностью

АП является реализованная в нем возможность вращения размещенного между ПЭП образца вокруг своей оси на 360° с заданным шагом, начиная с 1° . Кроме того, авторский вариант АП был дополнен цифровым устройством контроля прижима ПЭП к образцу, что обеспечивало минимизацию влияния указанного прижима на характеристики электроакустического измерительного тракта при переходе на каждый последующий шаг измерений.

В отличие от обычно используемых в комплекте с АП для проведения УЗ измерений дефектоскопов (например, УД2-12 или УД2-16) лабораторный стенд был снабжен импульсным генератором дефектоскопа УД2Н-ПМ, обеспечивающим возбуждение излучающего ПЭП электрическим сигналом в виде меандра амплитудой 300 В, а также аналого-цифровым преобразователем Е20-10 с частотой дискретизации 5 МГц, Оцифрованный принятый сигнал регистрировался на персональном компьютере в виде записей длительностью 205 мс, или 1024 отсчетов. По указанным записям с учетом осреднения результатов 50 по-

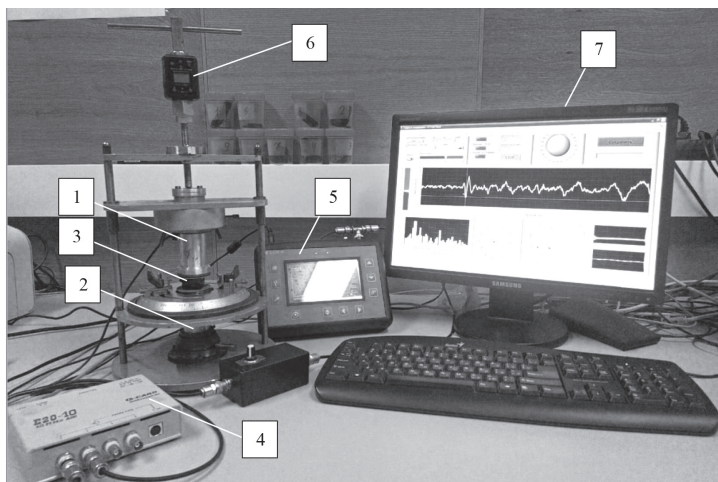


Рис. 1 Внешний вид лабораторного стенда: 1 – излучающий УЗ ПЭП; 2 – приемный УЗ ПЭП; 3 – образец; 4 – АЦП; 5 – генератор; 6 – устройство контроля прижимного усилия; 7 – компьютер

Fig. 1. Laboratory setup: 1 – emitting ultrasonic transducer; 2 – receiving ultrasonic transducer; 3 – sample; 4 – ADC; 5 – generator; 6 – pressure control device; 7 – computer

следовательных измерений автоматически вычислялись искомые значения скорости распространения V_s , и амплитуды A_s первой полуволны поперечных упругих волн.

Очевидно, что на уровень первого вступления принимаемого сигнала S волн будут влиять ряд факторов. Среди наиболее значимых следует выделить два. Это, во-первых, давление P прижима ПЭП к образцу. С одной стороны, с увеличением величины P контактные условия (КУ) ПЭП с образцом улучшаются, однако с другой — при достижении некоторого критического уровня напряжений $\sigma_{кр}$ в образце возникают структурные изменения, как следствие теряется важнейшее преимущество УЗ измерений, связанное с отсутствием их влияния на искомые свойства геоматериала. Опыт показывает, что для отсутствия такого влияния необходимо, чтобы создаваемое в образце прижимным давлением значение $\sigma_{кр}$ не превышало $0,5 \sigma_c$. При этом геоматериал гарантированно не выходит за пределы стадии уплотнения [16].

Вторым фактором, определяющим качество КУ ПЭП S -волн с образцами угля, является вязкость контактной среды, размещаемой между ПЭП и поверхностями ввода и приема УЗ сигнала. При недостаточной вязкости эффективность передачи сдвиговых колебаний в ОК резко падает. Казалось бы, такую передачу можно реализовать путем применения в качестве контактной среды упомянутых выше высоковязких растворов некристаллизующихся полисахаридов. Однако по ряду причин при УЗ исследованиях углей такое применение оказывается невозможным. Во-первых, это связано с относительно высокой трещиноватостью и пористостью углей, в результате чего контактная среда проникает в геоматериал, изменяя его свойства. Во-вторых, вязкость таких раство-

ров сильно зависит от количества в них влаги. Если это количество велико, то молекулы сахарозы покрыты слоем из молекул воды и поэтому относительно свободны. При высокой концентрации сахарозы (как это имеет место, например, у природного и искусственного меда) ее молекулы образуют друг с другом водородные связи, обеспечивающую высокую вязкость. Наконец, в-третьих, свойства (в частности вязкость) полисахаридов существенно зависят от температуры, что ограничивает их применение при исследовании динамики акустических свойств углей под влиянием изменяющихся термических (криотермических) воздействий.

В связи с изложенным предлагается исключить применение жидких контактных сред для ввода и приема S -волн в образцы угля, заменив их наждачной бумагой (шлифовальной шкурки), используемой либо непосредственно в качестве протектора ПЭП, либо приклеиваемой к жесткой поверхности уже существующего металлического протектора. Для подтверждения возможности такой замены на описанном выше стенде были проведены исследования волновых форм сигналов S -волн, прошедших через образцы антрацита, каменного и бурого угля. На рис. 2 в качестве примера приведены такие зависимости для антрацита, полученные при использовании в качестве контактной среды меда и наждачной бумаги с различным размером зерна. Отметим, что на рис. 2 использована маркировка наждачной бумаги в соответствии с ISO 6344. Для P30, P60, P180 и P400 основной размер абразивных частиц (зерна) составляет соответственно 600 мкм, 250 мкм, 75 мкм и 35 мкм.

Анализ рис. 2 показывает, что применение в качестве контактной среды наждачной бумаги по сравнению с медом обеспечивает значительно более

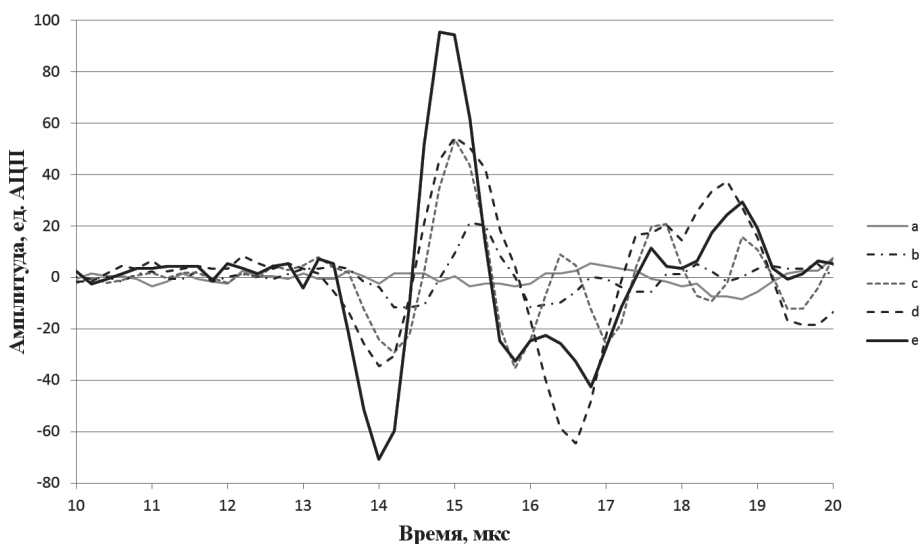


Рис. 2 Волновые формы S -волн при использовании в качестве контактной среды между ПЭП и образцом антрацита наждачной бумаги P30 (a), P60 (b), P180 (c), P400 (d) и меда (e)

Fig. 2. Waveforms of S -waves when using sandpaper P30 (a), P60 (b), P180 (c), P400 (d) and honey (e) as a contact medium between the transducers and anthracite sample

низкий уровень амплитуды первой полуволны сигнала поперечных волн. Однако уже для P60 этот уровень вполне достаточен для дальнейших акустоэлектрических преобразований и измерений величин V_s и A_s . Видно также, что для антрацита уровень амплитуды первой S полуволны зависит от ее зернистости, с уменьшением которой этот уровень устойчиво растет.

Волновые формы сигналов, были получены также для каменного и бурого углей. В целом они схожи с представленными на рис. 2, то есть полученными на антраците. Вообще, учитывая современный уровень электроники, для практического измерения параметров S волны, важно не столько абсолютное значение A_s , сколько отношение сигнал-шум (С/Ш) на выходе приемного ПЭП. Под шумом здесь имеется в виду уровень огибающей колебательного процесса, предшествующего первому вступлению S волны. Отношение С/Ш для антрацита, каменного и бурого углей при различных вариантах КУ отражают

диаграммы на рис. 3. Обращает на себя внимание, что для антрацита указанное отношение с уменьшением зернистости наждачной бумаги зерна (соответственно увеличением количества зерен на единицу площади) постоянно растет, увеличиваясь более чем на порядок при переходе от P30 к P400. Для каменного и бурого углей соответствующая зависимость не столь однозначна. В первом случае имеется экстремум при P180, а во втором при P60.

Хотя по сравнению с медом применение наждачной бумаги в качестве контактной среды между ПЭП S волн и образцами угля обеспечивает меньшее отношение С/Ш, однако оно минимизирует влияние процесса УЗ измерений на акустические свойства ОК и обеспечивает постоянство соответствующих контактных условий. Отмеченное наглядно иллюстрируется полученными на образце антрацита и представленными на рис. 4 акустополяриграммами. Последние представляют собой кривые, отражающие зависимости амплитуды

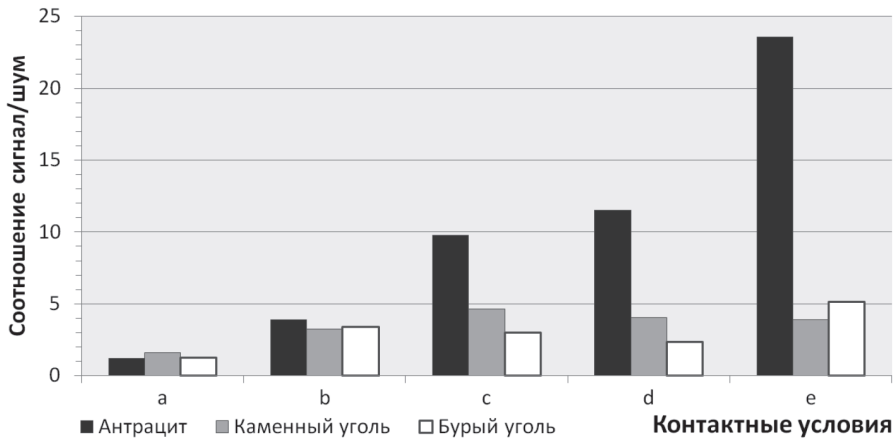


Рис. 3. Отношение С/Ш для антрацита, каменного и бурого углей при использовании для обеспечения КУ ПЭП S волн с образцом: наждачной бумаги P30 (a), P60 (b), P180 (c), P400 (d) и меда (e)

Fig. 3. S/N ratio for anthracite, hard coal and lignite when using sandpaper P30 (a), P60 (b), P180 (s), P400 (d) and honey (e) as a coupling medium

принятых УЗ сигналов поперечных волн от угла поворота образцов вокруг своей оси. Получение акустополяриграмм осуществлялось с использованием представленной на рис. 1 лабораторной установки. При этом угол поворота образца изменялся дискретно с шагом 30° . На каждом следующем шаге измерений прижимное давление ПЭП к образцу по возможности поддерживалось постоянным. Очевидно, что в случае постоянства КУ на каждом шаге поворота образца

и отсутствия влияния контактной среды на его акустические свойства акустополяриграмма должна представлять собой замкнутую кривую.

Другими словами, значения параметра A_s , полученные при углах 0° и 360° должны совпадать. Как видно из рис. 4, а, при использовании в качестве контактной среды наждачной бумаги (P400) такое совпадение действительно имеет место. В то же время, когда роль контактной среды выполняет мед, $A_s(0^\circ) \neq$

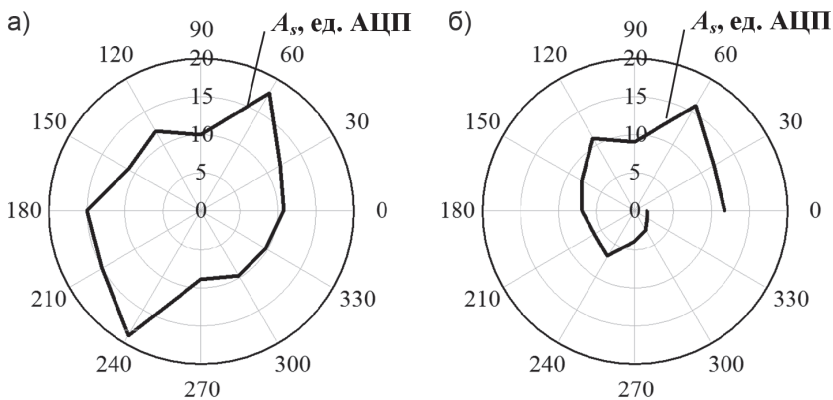


Рис. 4. Зависимость A_s от угла поворота образца при использовании в качестве контактной среды наждачной бумаги (P400) (a) и меда (б)

Fig. 4. The dependence of A_s on the angle of rotation of the sample when using sandpaper (P400) (a) and honey (b) as a coupling medium

≠ $A_3(360^\circ)$ и акустополириграмма оказывается разомкнутой.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о наличии ряда особенностей использования поперечных волн для оценки свойств и состояния горных пород ультразвуковым методом на образцах. Для хрупких трещиноватых пород (таких как уголь) необходимое для эффективного ввода и приема упругих волн использование жидких контактных сред приводит к постепенному изменению свойств поверхностного слоя образца. Это искажает результаты проведения многократных ультразвуковых измерений, особенно при наличии внешних воздействий на образец. Для решения задачи обеспечения эффективных контактных условий акустических преобра-

зователей с образцами угля целесообразно вместо вязких контактных сред использовать наждачную бумагу. Причем для более прочных углей, таких как антрацит, предпочтительнее использовать абразив наименьшей крупности (P400 по ISO 6344), а для менее прочных наилучшие результаты достигаются при крупности P60 – P180. В целом, по сравнению с некристаллизующимися полисахаридами, использование обеспечиваемого наждачной бумагой сухого контакта приводит к снижению амплитуды регистрируемых поперечных волн, однако соотношение сигнал/шум оказывается достаточным для их надежной регистрации. При этом подобные контактные условия не повреждают образец и позволяют проводить многократные измерения, в том числе при циклическом изменении температурных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taheri A., Squires J., Meng Z., Zhang Z.* Mechanical properties of brown coal under different loading conditions // *International Journal of Geomechanics*. 2017, Vol. 17, no 11, Article number 06017020.
2. *Шкуратник В. Л., Данилов В. Н.* Об использовании поверхностных волн Рэлея для определения упругих параметров горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2019. – № 3. – С. 48–54.
3. *Njiekak G., Schmitt D. R.* Effective stress coefficient for seismic velocities in carbonate rocks: effects of pore characteristics and fluid types // *Pure and Applied Geophysics*. 2019, Vol. 176, no 4, pp. 1467 – 1485.
4. *Wang Z., Wang R., Li T., Zhao M.* The combined effects of pore structure and pore fluid on the acoustic properties of cracked and vuggy synthetic rocks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, Vol. 156, pp. 202 – 211.
5. *Kłopotowska A.* Ultrasonic constraint of the microfracture anisotropy of flysch rocks from the Podhale Synclinorium (Poland) // *International Journal of Earth Sciences*. 2018, Vol. 107, no 6, pp. 1941 – 1953.
6. *Szewczyk D., Bauer A., Holt R. M.* Stress-dependent elastic properties of shales-laboratory experiments at seismic and ultrasonic frequencies // *Geophysical Journal International*. 2018, Vol. 212, no 1, pp. 189 – 210.
7. *Khazanehdari J., Sothcott J.* Variation in dynamic elastic shear modulus of sandstone upon fluid saturation and substitution // *Geophysics*. 2003, Vol. 68, no 2, pp. 472 – 481.
8. *Xu X.-L., Zhang R., Dai F., Yu B., Gao, M.-Z., Zhang Y.-F.* Effect of coal and rock characteristics on ultrasonic velocity // *Meitan Xuebao. Journal of the China Coal Society*. 2015, Vol. 40, no 4, pp. 793 – 800.
9. *Zeroug S., Sinha B. K., Lei T., 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, pp. D83 – D95.

10. Dambly M. L. T., Nejati M., Vogler D., Saar M. O. On the direct measurement of shear moduli in transversely isotropic rocks using the uniaxial compression test // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, Vol. 113, pp. 220 – 240.
11. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.
12. Глозман И. А. Пьезокерамика. — М.: Энергия, 1972. — 288 с.
13. Gorbatsevich F. F. Acoustopolariscopy. A new direction in investigation of anisotropic heterogeneous media // *Acta Acustica (Stuttgart)*. 2003, Vol. 89, pp. 122 – 123.
14. Gorbatsevich F. F. Physical principles and instruments for the acoustic polarization method of determining elastic anisotropy in rock samples // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1987, Vol. 91, no 2, pp. 493 – 500.
15. Gorbatsevich F. F. Acoustic polarization method for determining elastic symmetry and constants of anisotropy in solid media // *Ultrasonics*, 1999, Vol. 37, no 4, pp. 309 – 319.
16. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // *Journal of Mining Science*. 2016, Vol. 52, no 5, pp. 873 – 877. **ПТББ**

REFERENCES

1. Taheri A., Squires J., Meng Z., Zhang Z. Mechanical properties of brown coal under different loading conditions. *International Journal of Geomechanics*. 2017, Vol. 17, no 11, Article number 06017020.
2. Shkuratnik V. L., Danilov V. N. On the use of Rayleigh surface waves to determine the elastic parameters of rocks. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no 3, pp. 48–54.
3. Njiekak G., Schmitt D. R. Effective stress coefficient for seismic velocities in carbonate rocks: effects of pore characteristics and fluid types. *Pure and Applied Geophysics*. 2019, Vol. 176, no 4, pp. 1467 – 1485.
4. Wang Z., Wang R., Li T., Zhao M. The combined effects of pore structure and pore fluid on the acoustic properties of cracked and vuggy synthetic rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, Vol. 156, pp. 202 – 211.
5. Kłopotowska A. Ultrasonic constraint of the microfracture anisotropy of flysch rocks from the Podhale Synclitorium (Poland). *International Journal of Earth Sciences*. 2018, Vol. 107, no 6, pp. 1941 – 1953.
6. Szewczyk D., Bauer A., Holt R. M. Stress-dependent elastic properties of shales-laboratory experiments at seismic and ultrasonic frequencies. *Geophysical Journal International*. 2018, Vol. 212, no 1, pp. 189 – 210.
7. Khazanehdari J., Sothcott J. Variation in dynamic elastic shear modulus of sandstone upon fluid saturation and substitution. *Geophysics*. 2003, Vol. 68, no 2, pp. 472 – 481.
8. Xu X.-L., Zhang R., Dai F., Yu B., Gao, M.-Z., Zhang Y.-F. Effect of coal and rock characteristics on ultrasonic velocity. *Meitan Xuebao. Journal of the China Coal Society*. 2015, Vol. 40, no 4, pp. 793 – 800.
9. Zeroug S., Sinha B. K., Lei T., 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, pp. D83 – D95.
10. Dambly M. L. T., Nejati M., Vogler D., Saar M. O. On the direct measurement of shear moduli in transversely isotropic rocks using the uniaxial compression test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, Vol. 113, pp. 220 – 240.
11. *Ul'trazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya*. Pod red. I.N. Ermolova [Ultrasonic transducers for nondestructive testing. Ermolov I. N. (Ed.)], Moscow, Mashinostroenie, 1986, 280 p.
12. Gluzman I. A. *P'ezokeramika [Piezoceramic]*, Moscow, Energiya, 1972, 288 p.

13. Gorbatsevich F. F. Acoustopolariscopy. A new direction in investigation of anisotropic heterogeneous media. *Acta Acustica (Stuttgart)*. 2003, Vol. 89, pp. 122 – 123.

14. Gorbatsevich F. F. Physical principles and instruments for the acoustic polarization method of determining elastic anisotropy in rock samples. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1987, Vol. 91, no 2, pp. 493 – 500.

15. Gorbatsevich F. F. Acoustic polarization method for determining elastic symmetry and constants of anisotropy in solid media. *Ultrasonics*, 1999, Vol. 37, no 4, pp. 309 – 319.

16. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions. *Journal of Mining Science*. 2016, Vol. 52, no 5, pp. 873 – 877. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкуратник Владимир Лазаревич¹ – д-р техн. наук, профессор, e-mail: ftkp@mail.ru,
Николенко Петр Владимирович¹ – канд. техн. наук, доцент, e-mail: petrov-87@mail.ru,
Ануфренкова Полина Сергеевна¹ – аспирант,
¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Шкуратник В.Л., e-mail: ftkp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.L. Skuratnik¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: ftkp@mail.ru,
P.V. Nikolenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: petrov-87@mail.ru,
P.S. Anufrenkova¹, Graduate Student,

¹ National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.L. Skuratnik, e-mail: ftkp@mail.ru.

Получена редакцией 24.01.2020; получена после рецензии 21.02.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 24.01.2020; received after the review 21.02.2020; accepted for printing 20.03.2020.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

(2019, № 12, СБ 49, 24 с.)

Килин А.Б., Шаповаленко Г.Н., Гартман А.А. и др.

Статьи отражают результаты десятилетней работы по организации и повышению результативности инновационной деятельности на предприятиях угледобывающего производственного объединения, а также по развитию системы оплаты труда, направленной на обеспечение сбалансированности напряженности труда и уровня заработной платы. Представленный материал раскрывает связи результативности инновационной деятельности и структуры инновационных групп. В подготовке статей участвовали работники всех уровней управления угледобывающего объединения.

ENSURING EFFECTIVENESS OF INNOVATIVE ACTIVITIES OF ENTERPRISES OF COAL MINING PRODUCTION ASSOCIATION

Kilin A.B., Shapovalenko G.N., Gartman A.A., etc.

The ten years-long operation results achieved in management and effectivization of innovation activities in business units of a coal-mining industrial association, as well as in development of remuneration system toward the balance between the work intensity and salary level are described. The connections between the innovation activity effectiveness and the structure of innovation groups are disclosed. The articles are prepared with participation of employees from all management levels of the coal mining association.