

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕЙ ПЕЧОРСКОГО БАССЕЙНА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. Кравцов¹, П.Н. Иванов², О.Н. Малинникова³, Е.Б. Черепецкая², А.А. Гапеев²

¹ Department of Construction Technology, Faculty of Civil Engineering in Prague,
Thákurova 7/2077, 166 29 Prague 6 – Dejvice, Czech Republic

² МГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: pavelnivanov@mail.ru

³ ИПКОН РАН, Москва, Россия

Аннотация: Исследовались образцы углей Печорского месторождения, для которых предварительно определялся предел прочности на одноосное сжатие в направлении, перпендикулярном слоистости. Данные измерения показали, что для образцов из разных проб значения данной величины близки. На основе лазерно-ультразвуковой спектроскопии при сканировании в автоматическом режиме по поверхности образца с шагом 1 мм выполнена визуализация их внутренней структуры. Получено, что в вертикальных сечениях образцов трещины расположены в основном горизонтально и их ориентация совпадает с направлением слоистости. Определены их геометрические размеры и глубины залегания. Прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых волн впервые для углей позволили определить локальные значения модуля Юнга с точностью не хуже 1% и коэффициента Пуассона с погрешностью 5%. Получено, что наличие трещин протяженностью от 0,5 мм до 3 мм и величиной раскрытия 80—200 мкм приводит к разбросу в значениях модуля Юнга от 6,81 до 7,25 ГПа и коэффициента Пуассона от 0,23 до 0,29. По рассчитанным значениям модуля Юнга в программе «Surfer» построена карта его распределения по поверхности образца.

Ключевые слова: лазерная ультразвуковая структуроскопия, рентгеновская томография, уголь, геодинамические явления, метан, локальные модули упругости.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00824.

Для цитирования: Кравцов А., Иванов П. Н., Малинникова О. Н., Черепецкая Е. Б., Гапеев А. А. Исследование микроструктуры углей Печорского бассейна методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 56–65. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.

Laser–ultrasonic spectroscopy of the Pechora basin coal microstructure

A. Kravtsov¹, P.N. Ivanov², O.N. Malinnikova³, E.B. Cherepetskaya², A.A. Gapeev²

¹ Department of Construction Technology, Faculty of Civil Engineering in Prague,
Thákurova 7/2077, 166 29 Prague 6 – Dejvice, Czech Republic

² Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
Moscow, Russia, e-mail: pavelnivanov@mail.ru

³ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: Samples of the Pechora basin coal are tested with the pre-determined uniaxial compression strength in the normal direction to bedding. The test data show that different samples have close values of the uniaxial compression strength. The laser-ultrasonic spectroscopy in the mode of automatic scanning of coal sample surface at a pitch of 1 mm visualizes the internal structure of coal. It is found that in the vertical sections of the samples, cracks are mostly horizontal in conformity with the direction of bedding. The geometrical dimension and depth of cracks are determined. Based on the precision measurements of P- and S-wave velocities, the local values of Young's modulus and Poisson's ratio are for the first time obtained for coal accurate to 1 and 5%, respectively. The presence of cracks from 0.5 to 3 mm long with an opening of 80–200 μm results in dispersion of Young's modulus and Poisson's ratio in the ranges from 6.81 to 7.25 GPa and from 0.23 to 0.29. By the calculated values, the map of Young's modulus distribution over sample surface is plotted.

Key words: laser-ultrasonic structurescopy, X-ray tomography, coal, geodynamic phenomena, methane, local elasticity moduli.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 19-05-00824.

For citation: Kravtsov A., Ivanov P. N., Malinnikova O. N., Cherepetskaya E. B., Gapeev A. A. Laser-ultrasonic spectroscopy of the Pechora basin coal microstructure. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):56-65. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-56-65.

Введение

В современных условиях работы высокопроизводительных шахт и резкого увеличения темпов подвигания горных выработок, протяженности и производственной мощности очистных забоев заметно возрастает геодинамическая активность массивов горных пород и риски возникновения опасных, в том числе катастрофических, газодинамических явлений.

Анализ статистических и экспериментальных данных [1–9] показывает, что в возникновении газодинамических и геодинамических явлений, таких как внезапные выбросы угля и газа и горные удары, происходящие при проведении горных выработок в угольных шахтах, можно отметить некоторые закономерности [10]: практически всегда (более 95% случаев) происходят в момент подвигания забоя горной выработки, приводят к быстрому изменению напряженного состояния призабойной зоны пласта; большинство (90–95%) явлений внезапных выбросов и горных ударов происходит в зонах влияния мелкоамплитудных

тектонических нарушений [11–13], где резко меняются физико-механические свойства массива [12, 13], влияющие на его прочность.

Для прогноза и предупреждения динамических явлений в угольных шахтах необходимо четкое понимание распределения и изменения напряжения в призабойной зоне газоносного угольного пласта и распределения прочностных свойств угля, поскольку разрушение может начинаться на наиболее ослабленных контактах: трещинах естественного кливажа, макропорах, дефектах и т.п., аккумулирующих десорбирующийся метан при изменении напряженного состояния, и лавинообразно разрастаться в призабойной области.

Все это приводит к тому, что с учетом экстремальной гетерогенности углей, необходимо исследовать их внутреннюю структуру на различных масштабных уровнях, включая макро-, мезо- и микроуровни.

В настоящее время для изучения структурных особенностей находят широкое применение такие методы нераз-

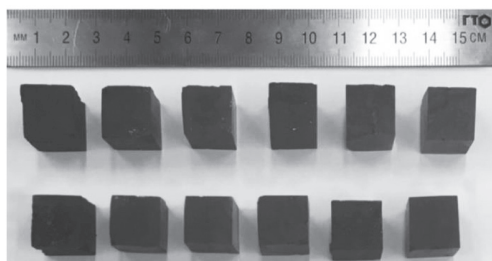


Рис. 1. Подготовленные образцы угля для механических испытаний

Fig. 1. Coal samples prepared for mechanical testing

рушающего контроля, как электронная микроскопия [14], рентгеновская компьютерная томография [15, 16] и ультразвуковая структуроскопия [17].

Если оптическая и электронная микроскопия предоставляют информацию о состоянии поверхности образца, которая частично нарушается при изготовлении шлифов, то рентгеновская компьютерная томография позволяет выполнить визуализацию внутренней структуры геоматериала во всем объеме исследуемого образца, выявлять дефекты (поры, трещины, неоднородности, газово-жидкие включения) в его отдельных сечениях, получать количественные значения (число пор, микротрещин, частиц и т.д., их линейные размеры, объемы, площадь поверхности, форму, сообщаемость пор) [18].

Визуализацию внутренней структуры образцов можно реализовать также на основе ультразвуковой структуроскопии [19]. Использование здесь сверхкоротких мощных ультразвуковых импульсов со строго контролируемой формой [20, 21] позволяет в образцах гетерогенных материалов измерять скорости продольных и поперечных волн с погрешностью 0,2%, определять локальные значения модулей упругости, геометрические размеры и глубины залегания микротрещин с точностью до 30 мкм.

В настоящей работе методом лазерно-ультразвуковой диагностики исследуется микроструктура углей.

Методы и материалы

Механические испытания

Объектом изучения являлись угли Печорского месторождения. Для проведения механических испытаний из каждой представленной пробы изготавливались кубики с длиной ребра порядка 15 мм (рис. 1) для определения предела прочности при одноосном сжатии. Отобранные образцы угля обладали высокой трещиноватостью. Поэтому для облегчения процесса пробоподготовки образцы помещались в пластиковую трубу и заливались гипсовым раствором. После его застывания из образовавшейся заготовки вручную вырезались кубики угля. Для проведения дальнейших исследований часть образцов распиливалась на плоскопараллельные пластины.

Изучение основных физико-механических свойств, таких, как предел прочности при сжатии и растяжении, выполнено на электромеханической испытательной машине LFM-50 с максимальной силовой нагрузкой 50 кН. В ходе испытания был определен предел прочности образцов при сжатии. При этом нагружения производились перпендикулярно направлению слоистости.

Лазерно-ультразвуковая структуроскопия

Исследование внутренней структуры проводилось с помощью лазерного ультразвукового структуроскопа ГЕОСКАН-02МУ, в котором с помощью короткого наносекундного импульса Nd:YAG лазера в оптико-акустическом генераторе возбуждался ультразвуковой импульс длительностью порядка 70 нс и амплитудой давления 0,1 МПа. Он направлялся в исследуемый образец. Широкополосным пьезоприемником, совмещенным с генератором, регистрировались сигналы, отраженные от границы раздела между генератором и образцом, а также от тыльной стороны образца и неоднородностей. Рассеянные на его неоднород-

ностях импульсы несли информацию о внутренней структуре объекта исследования. Сканирование проводилось по поверхности образца с шагом 1 мм. После обработки рассеянных импульсов строилось изображение внутренней структуры образца. По временной задержке ΔT сигналов относительно опорного сигнала при известной толщине образца H были рассчитаны скорости продольных волн V_l в каждой точке при сканировании по формуле:

$$V_l = \frac{2H}{\Delta T} \quad (1)$$

Следует отметить, что между первым и вторым донными сигналами продольных волн за счет граничных условий появляется дополнительно импульс поперечной волны, по соответствующей временной задержке которого относительно опорного сигнала можно рассчитать скорость поперечной волны V_t . Поскольку скорости упругих волн через плотность связаны с локальными модулями упругости, то они описываются следующими соотношениями [21]:

$$E = \rho V_t^2 \left[3 - \frac{1}{x^2 - 1} \right], \quad (2)$$

$$\mu = \frac{x^2 - 2}{2(x^2 - 1)}, \quad (3)$$

$$G = \rho V_t^2, \quad (4)$$

где E — модуль Юнга; G — модуль сдвига; μ — коэффициент Пуассона; ρ — плотность образца; V_t , V_l — значения скоростей поперечной и продольной акустических волн, соответственно, м/с.

На основе описанных выше измерений возможно построение карт распределения скоростей ультразвуковых волн и значений локальных модулей упругости. Для этих целей использовались плоскопараллельные пластины толщиной порядка 4–6 мм (рис. 2). Проводилось сканирование по поверхности образца ($z = 0$, рис. 2), параллельной его слоисто-

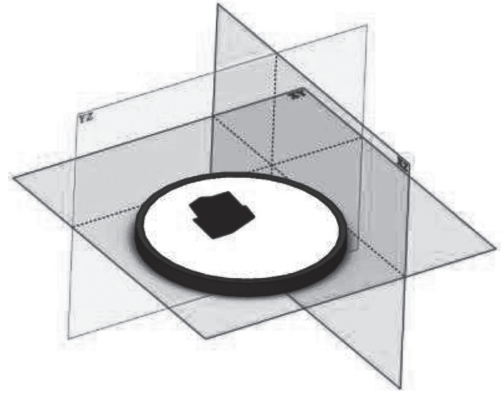


Рис. 2. Ориентация образца в пространстве при сканировании

Fig. 2. The orientation of the sample in space when scanning

сти. Информация о рассеянных и отраженных сигналах записывались в цифровой форме. По полученным акустическим трекам восстанавливалось любое сечение (XY , XZ , YZ) образца (рис. 2).

Результаты

В табл. 1 приведены объем образцов V , их масса m , плотность ρ , и полученные в результате проведения физико-механических испытаний значения пределов прочности на одноосное сжатие $R_{сж}$.

Исходя из статистической обработки данных, среднее значение предела прочности на одноосное сжатие составило $\sigma_{ср} = 15,7$ МПа при среднем квадратичном отклонении, равном 1,1 МПа и коэффициенте вариации соответственно 6,55.

Следует отметить, что данный метод определения физико-механических свойств является трудоемким, что определяется сложной подготовкой образцов. Также метод не предоставляет возможность изучить микроструктурные особенности гетерогенных сред, что наиболее важно при изучении углеродосодержащих пород. Поэтому для исследования внутренней структуры и определения локальных упругих модулей в работе применялся метод лазерно-ультразвуковой структу-

Таблица 1

Физико-механические характеристики образцов угля
Physics and mechanicals characteristics of coal samples

№	$V, 10^{-5} \text{ м}^3$	$m, 10^{-3} \text{ кг}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$R_{\text{сж}}, \text{ МПа}$
1	0,341	4,73	1387	17,0
2	0,326	4,53	1389	15,6
3	0,315	4,29	1361	14,6
4	0,337	4,33	1284	17,0
5	0,342	4,46	1304	14,3
6	0,349	4,82	1381	14,8
7	0,342	4,37	1277	15,9
8	0,354	4,65	1313	16,8
9	0,358	4,71	1315	16,1
10	0,348	4,52	1298	16,7
11	0,341	4,42	1296	15,3
12	0,338	4,62	1366	14,4

роскопии. В результате оптико-акустического сканирования, были получены сечения образцов, два из которых, расположенных в плоскостях XY_1 и XY_2 приведены на рис. 3.

На изображении, соответствующем сечению XY_1 (рис. 3, а), представлена система дефектов 1 в виде трещин. На изображении присутствует также паразитный сигнал 2, который возникает вследствие конструктивных особенностей оптико-акустического генератора, связанных с переотражением опорного сигнала от поверхностей призмы звукопровода и склейки преобразователя.

На рис. 3, а виден сигнал 3, полученный от донной поверхности образца. На

скане видно, что трещины залегают на глубине от 0,5 до 3 мм. Их протяженность составляет 1—2 мм, величина раскрытия лежит в диапазоне от 80 до 200 мкм. На В-скане XY_2 выделена система трещин 4, которые так же, как и слоистость, имеют горизонтальную направленность. Слабый донный сигнал 3, наблюдаемый на рис. 3, связан с сильным затуханием ультразвукового сигнала, обусловленного гетерогенной структурой угля и наличием трещин.

В ходе работы были измерены скорости продольных V_l и поперечных V_t волн с погрешностью 0,2%. По данным скоростям с помощью выражений (2) и (3) были рассчитаны модуль Юнга E , ко-

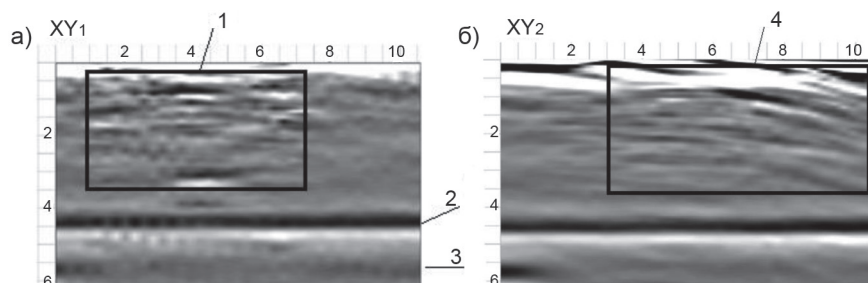


Рис. 3. Изображения внутренней структуры угля в направлении осей XY_1 (а) и XY_2 (б)

Fig. 3. Images of the internal structure of coal in the direction of the axes XY_1 (а) and XY_2 (б)

Таблица 2

Результаты измерений упругих модулей на образце угля
Результаты измерений упругих модулей на образце угля

№	V_l , м/с	V_t , м/с	E , ГПа	$(V_l / V_t)^2$	μ
1	2334	1388	7,11	2,83	0,23
2	2456	1345	7,00	3,33	0,29
3	2347	1367	7,00	2,95	0,24
4	2378	1356	6,97	3,08	0,26
5	2389	1398	7,29	2,92	0,24
6	2348	1370	7,02	2,93	0,24
7	2335	1368	6,97	2,91	0,24
8	2332	1376	7,03	2,87	0,23
9	2379	1380	7,14	2,97	0,25
10	2367	1376	7,10	2,96	0,24
11	2337	1384	7,09	2,85	0,23
12	2378	1375	7,11	2,99	0,25
13	2394	1390	7,25	2,96	0,25
14	2340	1345	6,82	3,02	0,25
15	2331	1346	6,81	3,00	0,25
16	2313	1384	7,04	2,79	0,22
17	2365	1368	7,03	2,99	0,25
18	2348	1384	7,11	2,88	0,23
19	2390	1389	7,23	2,96	0,24
20	2361	1347	7,12	3,07	0,26

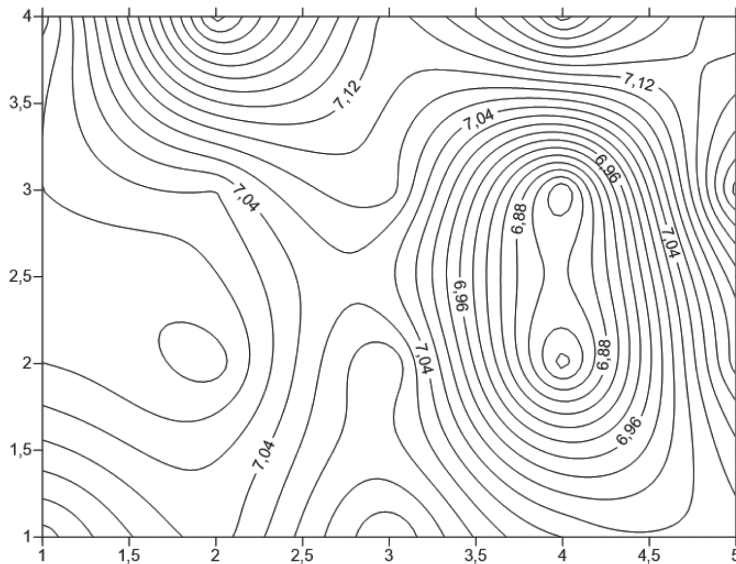


Рис. 4. Карта распределения модуля Юнга по образцу
 Fig. 4. The distribution map of the Young's modulus by sample

эффицент Пуассона μ и скорости продольных V_l и поперечных V_t волн на лабораторном образце угля толщиной 4 мм и плотностью 1500 кг/м³. Исходя из схемы сканирования, значения были получены в 20 точках образца.

Результаты измерений для одного из образцов представлены в табл. 2.

По значениям скоростей была построена карта распределения локальных модулей Юнга, которая представлена на рис. 4.

В данном случае схематически изображена поверхность образца, по которой с шагом 1 мм проходила регистрация упругой волны в автоматическом режиме. Более плотное количество изолиний на карте свидетельствует о постепенном изменении показателей модуля Юнга. Пониженные показатели модуля Юнга в некоторых областях свидетельствуют о дополнительной концентрации трещин в этой области.

Выводы, заключение

В работе исследовались образцы углей Печорского месторождения, для которых предварительно определялся предел прочности на одноосное сжатие в направлении, перпендикулярном слоистости. Данные измерения показали, что для

образцов из разных проб значения данной величины близки.

Поэтому дальнейшие исследования были проведены на образцах углей из данных проб. На основе лазерно-ультразвуковой спектроскопии выполнена визуализация их внутренней структуры. Установлено, что в вертикальных сечениях образцов трещины расположены в основном горизонтально и их ориентация совпадает с направлением слоистости. Определены их геометрические размеры и глубины залегания. Прецизионные измерения скоростей продольных и сдвиговых волн впервые для углей позволили определить локальные значения модуля Юнга с точностью не хуже 1% и коэффициента Пуассона с погрешностью 5%. Отмечено, что наличие трещин протяженностью от 0,5 мм до 3 мм и величиной раскрытия 80–200 мкм приводит к разбросу в значениях модуля Юнга от 6,81 до 7,25 ГПа и коэффициента Пуассона от 0,23 до 0,29.

Таким образом, методы лазерно-ультразвуковой спектроскопии являются перспективным направлением для исследования внутренней структуры на микроуровне и определения локальных упругих характеристик таких неоднородных сред, как угли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев Ю. Н., Айруни А. Т., Худин Ю. Л. Методы прогнозирования и способы предотвращения выбросов газа, угля и горных пород. — М.: Недра, 1995. — 352 с.
2. Прогноз и предотвращение горных ударов в шахтах / Под ред. И.Х. Петухова, А.М. Ильина, К.Н. Трубецкой. — М.: Издательство АГН, 1997. — 376 с.
3. Малинникова О.Н., Учаев Д.М., Учаев Д.В. Мультифрактальная оценка склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 12. — С. 214–232.
4. ГОСТ Р 58150-2018 Горное дело. Динамические явления в угольных шахтах. Термины и определения.
5. Стариков А.П., Зборщик М.П., Пилюгин В.И. Газодинамические явления в угольных шахтах: сущность происхождения, методы управления и способы снижения опасных проявлений // Уголь. — 2010. — № 12. — С. 5–8.
6. Kuchurin S.V., Shkuratnik V.L., Vinnikov V.A. Regularities of influence of disturbances on thermal emission memory in coal specimens // Journal of Mining Science, 2008, 44 (2), pp. 131–137.

7. Guo W.-Y., Zhao T.-B., Tan Y.-L., Yu, F.-H. Hu, S.-C. Yang F.-Q. Progressive mitigation method of rock bursts under complicated geological conditions // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, pp. 11–22.

8. Lihai Tan, Ting Ren, Xiaohan Yang, Xueqiu He. A numerical simulation study on mechanical behaviour of coal with bedding planes under coupled static and dynamic load // International Journal of Mining Science and Technology, 28 (2018), pp. 791–797.

9. Dudchenko O. L., Fedorov G. B., Andreev A. A. Innovative method for the classification of coal slurries // Ugol', 6 (2018), pp. 67–71.

10. Yang W., Wang H., Lin B., Wang Y., Mao X., Zhang J., Lyu Y., Wang M. Outburst mechanism of tunnelling through coal seams and the safety strategy by using «strong-weak» coupling circle-layers // Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74, pp. 107–118.

11. Yang S.-Q., Chen M., Jing H.-W., Chen K.-F., Meng B. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China // Engineering Geology, 2017, 217, pp. 89–101.

12. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Нелинейные деформационно-волновые процессы в образцах угля различного ранга, нагруженных до разрушения при различной температуре // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 4. — С. 641–658.

13. Qin Zhihong New advances in coal structure model // International Journal of Mining Science and Technology, 2018, pp. 541–559.

14. Qin Z.-H., Gong T., Li X.-S., Hou C.-L., Zhang D., Sun H. TEM analysis of coal extraction and coal inbuilt state structural model. Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao // Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37 (4), pp. 443–449.

15. Jonathan P. Mathews, Quentin P. Campbell, Hao Xuc, Phillip Halleck. A review of the application of X-ray computed tomography to the study of coal // Fuel, 2017, pp. 10–24.


16. Zhang G., Ranjith P. G., Perera M. S. A., Haque A., Choi X., Sampath. Characterization of coal porosity and permeability evolution by demineralisation using image processing techniques. A micro-computed tomography study // Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, pp. 384–396.

17. Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е. Взаимосвязь структурных особенностей и физико-механических свойств горных пород // Горный журнал. — 2017. — № 9. — С. 53–58.

18. 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, pp. 447–452.

19. Podymova N. B., Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B. Laser optoacoustic method for quantitative nondestructive evaluation of the subsurface damage depth in ground silicon wafers // Laser Physics, 2014, Vol. 24, no. 8, pp. 086003(1)–086003(5).

20. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Morozov D. V., Shibaev I. A. Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics // Key Engineering Materials, 2017, 722, pp. 267–272.

21. Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B., Podymova N. B. Laser-ultrasonic measurement of local elastic moduli / NDT in Progress 2015. 8th International Workshop of NDT Experts, Proceedings, 2015, pp. 75–78. 

REFERENCES

1. Malyshev Yu. N., Ayruni A. T., Khudin Yu. L. *Metody prognozirovaniya i sposoby predotvrashcheniya vybrosov gaza, uglya i gornykh porod* [Gas, coal and rock outbursts: prediction methods and prevention techniques], Moscow, Nedra, 1995, 352 p.

2. *Prognoz i predotvrashchenie gornykh udarov v shakhtakh* [Prediction and prevention of rock bursts in mines. I.Kh. Petukhov, A.M. Il'in, K.N. Trubetskaya (Eds.)], Moscow, Izdatel'stvo AGN, 1997, 376 p.

3. Malinnikova O. N., Uchaev D. M., Uchaev D. V. Multi-fractal assessment of gas-dynamic hazard of coal seams. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 12, pp. 214–232. [In Russ].

4. *Gornoe delo. Dinamicheskie yavleniya v ugol'nykh shakhtakh. Terminy i opredeleniya. GOST R 58150-2018* [Mining. Dynamic phenomena in coal mines. Terms and definitions. State Standart R 58150-2018].

5. Starikov A. P., Zborshchik M. P., Pilyugin V. I. Gas-dynamic phenomena in coal mines: implications, control and hazard reduction. *Ugol'*. 2010, no 12, pp. 5–8. [In Russ].
6. Kuchurin S. V., Shkuratnik V. L., Vinnikov V. A. Regularities of influence of disturbances on thermal emission memory in coal specimens. *Journal of Mining Science*, 2008, 44 (2), pp. 131–137.
7. Guo W.-Y., Zhao T.-B., Tan Y.-L., Yu, F.-H. Hu, S.-C. Yang F.-Q. Progressive mitigation method of rock bursts under complicated geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, pp. 11–22.
8. Lihai Tan, Ting Ren, Xiaohan Yang, Xueqiu He. A numerical simulation study on mechanical behaviour of coal with bedding planes under coupled static and dynamic load. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28 (2018), pp. 791–797.
9. Dudchenko O. L., Fedorov G. B., Andreev A. A. Innovative method for the classification of coal slurries. *Ugol'*, 6 (2018), pp. 67–71.
10. Yang W., Wang H., Lin B., Wang Y., Mao X., Zhang J., Lyu Y., Wang M. Outburst mechanism of tunnelling through coal seams and the safety strategy by using «strong-weak» coupling circle-layers. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 74, pp. 107–118.
11. Yang S.-Q., Chen M., Jing H.-W., Chen K.-F., Meng B. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'an coal mine, China. *Engineering Geology*, 2017, 217, pp. 89–101.
12. Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Usoltseva O. M., Tsoy P. A., Semenov V. N. Nonlinear deformation-wave processes in various rank coal samples loading to failure under different temperatures. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no 4, pp. 641–658. [In Russ].
13. Qin Zhihong New advances in coal structure model. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, pp. 541–559.
14. Qin Z.-H., Gong T., Li X.-S., Hou C.-L., Zhang D., Sun H. TEM analysis of coal extraction and coal inbuilt state structural model. *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao. Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37 (4), pp. 443–449.
15. Jonathan P. Mathews, Quentin P. Campbell, Hao Xuc, Phillip Halleck. A review of the application of X-ray computed tomography to the study of coal. *Fuel*, 2017, pp. 10–24.
16. Zhang G., Ranjith P. G., Perera M. S. A., Haque A., Choi X., Sampath. Characterization of coal porosity and permeability evolution by demineralisation using image processing techniques. A micro-computed tomography study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, pp. 384–396.
17. Vaysberg L. A., Kameneva E. E. Взаимосвязь структурных особенностей и физико-механических свойств горных пород. *Gornyy zhurnal*. 2017, no 9, pp. 53–58. [In Russ].
18. 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, pp. 447–452.
19. Podymova N. B., Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B. Laser optoacoustic method for quantitative nondestructive evaluation of the subsurface damage depth in ground silicon wafers. *Laser Physics*, 2014, Vol. 24, no. 8, pp. 086003(1)–086003(5).
20. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Morozov D. V., Shibaev I. A. Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics. *Key Engineering Materials*, 2017, 722, pp. 267–272.
21. Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B., Podymova N. B. Laser-ultrasonic measurement of local elastic moduli. *NDT in Progress 2015. 8th International Workshop of NDT Experts, Proceedings*, 2015, pp. 75–78.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кравцов Александр — PhD, e-mail: kravtale@fsv.cvut.cz,
 Department of Construction Technology, Faculty of Civil Engineering in Prague,
 Thákurova 7/2077, 166 29 Prague 6 — Dejvice, Czech Republic,
 Иванов Павел Николаевич¹ — инженер, e-mail: pavelnivanov@mail.ru,
 Малинникова Ольга Николаевна — д-р техн. наук,
 e-mail: olga_malinnikova@mail.ru, ИПКОН РАН,

Черепецкая Елена Борисовна¹ — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, e-mail: echerpetskaya@mail.ru,
Гапеев Артем Андреевич¹ — студент, e-mail: tema.gapeev135@yandex.ru,
¹ МГИ НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Иванов П.Н., e-mail: pavelnivanov@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. Kravtsov, PhD, e-mail: kravtale@fsv.cvut.cz,
Department of Construction Technology, Faculty of Civil Engineering in Prague,
Thákurova 7/2077, 166 29 Prague 6 — Dejvice, Czech Republic,
P.N. Ivanov¹, Engineer, e-mail: pavelnivanov@mail.ru,
O.N. Malinnikova, Dr. Sci. (Eng.), e-mail: olga_malinnikova@mail.ru,
Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,
E.B. Cherepetskaya¹, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, e-mail: echerpetskaya@mail.ru,
A.A. Gapeev¹ — Student, e-mail: tema.gapeev135@yandex.ru,
¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: P.N. Ivanov, e-mail: pavelnivanov@mail.ru.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ОХРАННОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ НА СОВРЕМЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ

(№ 1189/06—19 от 23.05.2019; 9 с.)

Пичуев Александр Вадимович¹ — канд. техн. наук, доцент,
Котрюмин К.А. — магистрант кафедры,
¹ МГИ НИТУ «МИСиС».

В соответствии с действующими нормативно-правовыми актами рассмотрены основные требования к системам охранного и технологического видеонаблюдения на современных цифровых электрических подстанциях. Дана характеристика функциям контроля и взаимодействия систем охранного и технологического видеонаблюдения, изложены основные принципы построения системы обеспечения информационной безопасности, представлены составные элементы программно-технического комплекса и основные технические механизмы обеспечения. Рассмотрены пути реализации основных мероприятий по обеспечению информационной безопасности.

Ключевые слова: система охранного видеонаблюдения, система технологического видеонаблюдения, цифровая подстанция, система обеспечения информационной безопасности.

REQUIREMENTS FOR SYSTEMS SECURITY AND TECHNOLOGICAL SURVEILLANCE TO MODERN DIGITAL ELECTRIC SUBSTATIONS

A.V. Pichuev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
K.A. Kotryumin¹, Master's Degree Student,
¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

In the article, in accordance with the current regulations, the basic requirements for security and technological video surveillance systems at modern digital electrical substations are considered. The characteristics of the functions of control and interaction of security and technological video surveillance systems are given, the basic principles of building an information security system are presented, the components of the software and hardware complex and the main technical support mechanisms are presented. The ways of implementation of the main measures to ensure information security are considered.

Key words: surveillance system, surveillance system technology, digital substation, the system of information security.