

ПРИТОК МЕТАНА В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

М.В. Курленя¹, М.Н. Цупов¹, А.В. Савченко¹

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: sav@eml.ru

Аннотация: Дана оценка сейсмического воздействия взрывных работ на угольный пласт «Кумпановский» шахты «Бутовская», г. Кемерово, Кузбасс, при проходке подготовительной выработки и зарегистрирован рост концентрации метана. Установлена область его миграции, связанная с изменением геомеханического состояния горных пород, а также с мощностью и местоположением взрыва. Определены минимальные амплитуды колебаний угольного массива и рассчитана плотность потока сейсмической энергии, при которой начинается дополнительное поступление метана в подземные горные выработки. Проведено измерение сейсмического сигнала и эмиссии метана в горные выработки при уменьшении расстояния от места взрыва. Определен объем дополнительного выхода метана в горную выработку. Получена зависимость уменьшения амплитуды скорости смещения среды и плотности потока сейсмической энергии с удалением от места взрыва. Рассчитан радиус дегазации угольного массива в зависимости от начально создаваемой амплитуды колебаний и плотности потока сейсмической энергии. Показано распределение плотности потока сейсмической энергии от расположения источника взрыва. Предложена методика вычисления значений величин, характеризующих динамическое воздействие на метаноносный угольный пласт применительно к задаче обоснования технологии его дегазации и контроля рудничной атмосферы.

Ключевые слова: технологические взрывы, натурные измерения, сейсмические колебания, плотность потока сейсмической энергии, метан, шахта, угольный пласт, зона газовыделения, дегазация.

Для цитирования: Курленя М. В., Цупов М. Н., Савченко А. В. Приток метана в горные выработки в результате воздействия технологических взрывов на угольный пласт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 5–14. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_5.

Methane inflow in roadways as a result of process blasting impact on coal seam

M.V. Kurlenya¹, M.N. Tsupov¹, A.V. Savchenko¹

¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia, e-mail: e-mail: sav@eml.ru

Abstract: The blasting-induced seismic load on Kumpanovsky coal seam in Butovskaya Mine, Kemerovo, Kuzbass in the course of temporary roadway heading is estimated, and the increased concentration of methane is recorded. The delineated zone of methane migration is connected with alternation in the rock mass condition, as well as with the blast location and strength. The minimum amplitudes of coal vibrations are determined, and the seismic energy flow density sufficient to initiate extra inflow of methane in roadways is calculated. The seismic signal and methane emission in roadways are determined with a decreasing distance from the blasting point. The volume of additional methane emission in roadways is found. The decrease in the PPV value and in the seismic energy density is calculated versus the increasing distance from the blasting site. The methane outgassing radius in coal is calculated as function of the initial excited vibration amplitude and seismic energy flow density. The seismic energy flow density pattern is presented depending on the blast source location. The calculation procedure of characteristics of impact on methane-bearing coal seam is proposed for substantiation of coal seam drainage technology and mine air control.

Key words: process blasts, in-situ measurements, seismic vibrations, seismic energy flow density, methane, mine, coal seam, gas emission zone, outgassing.

For citation: Kurlenya M. V., Tsupov M. N., Savchenko A. V. Methane inflow in roadways as a result of process blasting impact on coal seam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):5-14. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_5.

Введение

Поступление метана в горные выработки происходит вследствие естественной дегазации угольного пласта, природных и техногенных влияний на него. В работе [1] приведен рост концентрации метана в горных выработках во время землетрясения магнитудой 5,3 на расстоянии 17 км от шахты «Чертинская-Южная» в Кузбассе. Аналогичная кар-

тина имела место на шахтах Китая [2], где произошли землетрясения магнитудой 3,6 и 0,3 с эпицентрами на удалении 66 км и 2,6 км соответственно. Авторы этих публикаций отмечают, что после прохождения сейсмических волн в массиве горных пород повышаются проницаемость и дебит метана. Согласно наблюдениям [3–5] величина и длительность поступления метана в горные

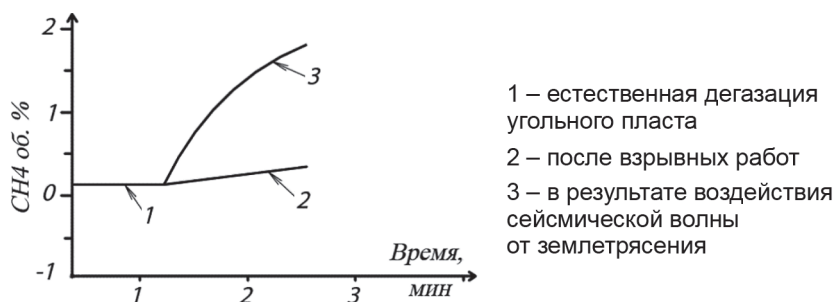


Рис. 1. Поступление метана из угольного пласта в горную выработку

Fig. 1. Methane inflow from coal seam to roadway

выработки зависит, прежде всего, от энергии воздействия на угольный пласт, а его проницаемость — от перераспределения напряжений в породном массиве [6–9]. Результаты моделирования данного явления на примере землетрясения, произошедшего на шахте Лаохутай, Китай [2], показывают, что изменение пористости и проницаемости определяется деформацией, вызванной сейсмической волной, и избыточным поровым давлением. При прохождении сейсмической волны скелет угля деформируется, и давление метана в нем повышается, что приводит к повышению его проницаемости. Пиковая скорость колебаний массива стимулирует дегазацию угольного пласта [10].

Снижение напряженно-деформируемого состояния угольного пласта способствует десорбции газа с последующим увеличением проницаемости за счет варьирования раскрытия трещин и макропор [11–13].

Исследование взрывов на массив горных пород [14] показало, что они активируют процесс миграции метана и стимулируют его приток в горную выработку. В [15] при ведении подземных горных работ отмечается возникновение техногенных землетрясений с магнитудой до 4 баллов и более на глубине 500 м. Описанные выше явления представлены графически на рис. 1.

Таким образом, существует важная практическая задача горного производства по оценке роли взрывных работ, повышающих газообильность подземных выработок, на угольных шахтах. Необходимо установить условия, при которых данный фактор реализуется, и каким образом его следует учитывать в технологических процессах. Поэтому требуется определить предельное значение сейсмической энергии, передаваемой массиву горных пород, и объем метана, высвобождающийся из угольного пласта.

Методика исследований

Целью исследований является установление дополнительного поступления метана из угольного пласта в подземные выработки вследствие сейсмического воздействия взрыва при выполнении горных работ. Натурный эксперимент проводился на шахте «Бутовская» в Кузбассе на разрабатываемом пласте «Кумпановский» мощностью 1,5 м и преобладающим углом падения — 18°. В пласте имеется включение породного прослойка алевролита мощностью 0,10–0,15 м. Уголь полублестящий, широкополосчатой текстуры. В его нижней части прослеживается «ложная почва», представленная перемятым алевролитом мощностью 0,1–0,5 м. Основная кровля сложена преимущественно крепкими песчаниками и частично алевролитами, непосредственная — алевролитами, реже песчаниками. Почва — трещиноватые алевролиты с большим содержанием растительного детрита и углистого вещества. Прогнозная газоносность «Кумпановского» пласта по материалам геологоразведочных работ составляет 17,5–21,5 м³/с.б.м. На глубинах 350 м и более от дневной поверхности пласт относится к угрожаемым по горным ударам, согласно заключению ВНИМИ № 18 от 24.08.2017. Ниже горизонта 220 м он отнесен к категории опасных по внезапным выбросам угля и газа (по заключению НЦ ВостНИИ № 14-614 КГ от 26.09.2016). Уголь «Кумпановского» пласта склонен к самовозгоранию.

Эксперименты включали проведение по угольному пласту буровзрывным способом выработки (сбойки) длиной 230 м по направлению к конвейерному штреку. Источником сейсмического воздействия на массив горных пород в этом случае является подрыв взрывчатого вещества ПЖВ-20 массой 9,6 кг, равномерно распределенного между 16 шпурами глубиной 1,8 м в одном цикле взрыва. Диа-

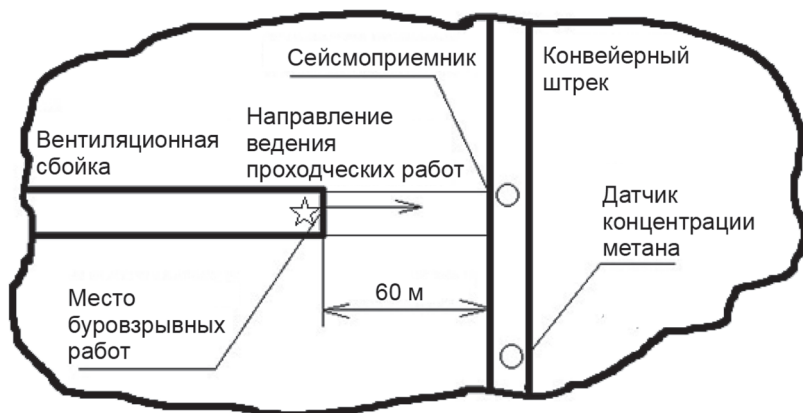


Рис. 2. Расположение горных выработок в угольном пласте и измерительной аппаратуры при выполнении экспериментальных работ

Fig. 2. Layout of roadways in coal seam and arrangement of measurement equipment during experimentation

метр пробуренных шпуров для закладки заряда взрывчатого вещества — 43 мм.

На конвейерном штреке велись наблюдения за поступлением дополнительного объема метана и скорости смещения массива горных пород. В нем были установлены сейсмоприемник GS-ONE и датчик концентрации метана фирмы «Гранч». Перед проведением очередного взрыва определялось расстояние от точки размещения датчиков в конвейерном штреке до места заложения взрывчатого вещества (рис. 2). Запись сейсмического сигнала осуществлялась непосредственно перед взрывом. После размещения заряда в шпуров забоя вентиляционной сбойки и взрыва угольного массива сигналы с датчика газового контроля поступали на компьютер диспетчерской службы шахты «Бутовская», а сейсмический сигнал с датчика GS-ONE — на взрывозащищенный планшет.

Основные результаты исследований

Проведенные серии взрывов фиксированной мощности с учетом приближения места их проведения к конвейерному штреку позволили установить начало выхода метана из угольного массива.

При величине остаточного целика 60 м и после очередного взрыва было зарегистрировано дополнительное увеличение дебита метана из угля в конвейерный штрек, которое достигло 10%. Последующие взрывы и уменьшение размеров остаточного целика сопровождалось ростом выхода метана. Анализ сейсмического сигнала показал, что через 0,15 с от момента взрыва происходит первое вступление продольной волны. Пиковое значение амплитуды поперечной волны составило 0,11 мм/с (рис. 3).

Спектральный анализ полученных сигналов от взрывного источника свидетельствует, что частота основной гармоники в распространяющейся по угольному пласту сейсмической волне соответствует — 31,5 Гц (рис. 4).

Для обоснования технологии дегазации угольного пласта необходимо определить минимальную плотность потока сейсмической энергии, при которой начинается дополнительный выход метана в зависимости от амплитуды и частоты колебаний.

Оценку плотности потока сейсмической энергии от взрывного источника и расчет распространения сейсмических волн произведем по уравнениям дина-

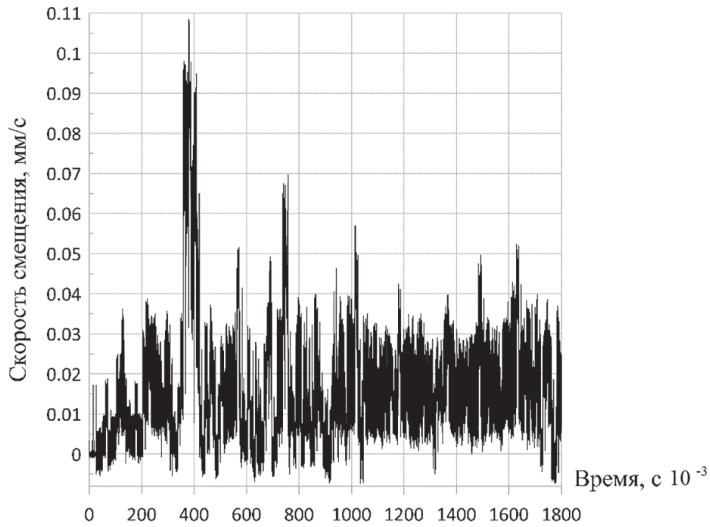


Рис. 3. Сейсмический сигнал от взрыва

Fig. 3. Blast-induced seismic signal

мической теории упругости [16] для однородной изотропной среды. В качестве примера выполним расчет для зарегистрированных параметров сигнала и физико-механических свойств каменного угля для шахт Кузбасса, приведенных в работе [17]. Модуль Юнга для угля меняется в пределах 3,158–3,854 ГПа,

коэффициент Пуассона $\nu = 0,17$, средняя плотность $\rho = 1365 \text{ кг/м}^3$.

Разрушение и разупрочнение угольного массива от взрыва в радиальном направлении составило 1–1,5 м. За зоной предразрушения, в радиусе свыше 3,0–3,5 м, по угольному пласту распространяются упругие волны. Применим

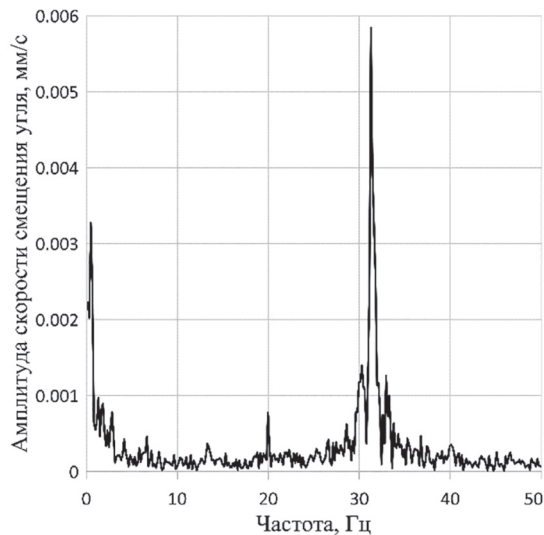


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр сейсмического сигнала

Fig. 4. Amplitude–frequency spectrum of seismic signal

для расчета распространения сейсмических волн уравнения динамической теории упругости [16] для однородной изотропной среды, а именно:

- уравнение состояния

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma,$$

- соотношения Коши-Грина для скорости смещения частиц угла \vec{v}

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T),$$

где σ – тензор напряжений; E – тензор деформаций.

Компоненты тензора напряжений и деформаций связаны законом Гука

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{\alpha\alpha} + 2\mu \varepsilon_{ij},$$

в котором σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензора напряжений и деформаций; λ , μ – коэффициенты Ламе. Связь λ , μ с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν устанавливается уравнениями:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)},$$

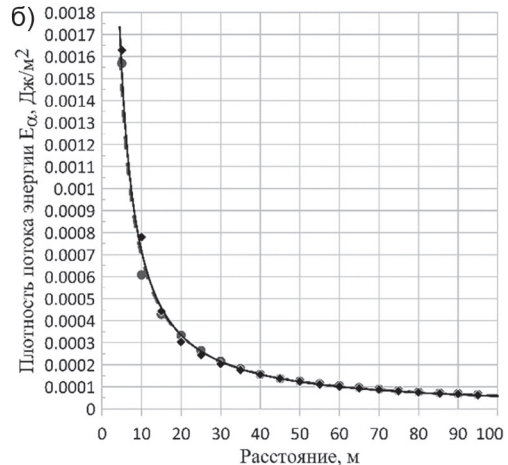
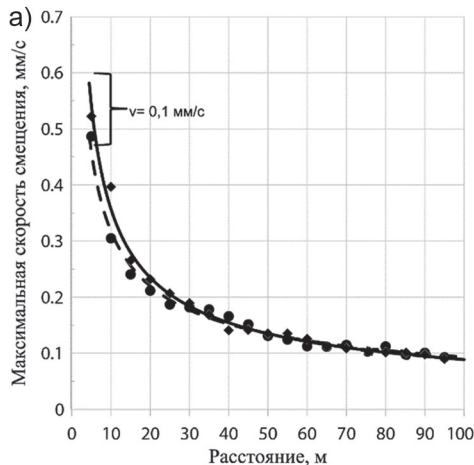
$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

На границе пласта в точке взрыва зададим условие в виде импульса Риккера [18] на скорость смещения частиц среды, исключив зону дробления и пластической деформации, при этом учитывая, что волна распространяется по упругой среде:

$$v_0(t) = A \left(1 - 2(\pi f_0 t)^2\right) \cdot \exp\left(-(\pi f_0 t)^2\right).$$

Здесь A – амплитуда скорости смещения; $f_0 = 31,5$ Гц – частота волны; t – время.

На внешнем контуре для полного поглощения волны и не выходе ее за границу расчетной области поставим идеально согласованный слой [19]. После решения задачи в программном комплексе ANSYS получим зависимость уменьшения амплитуды скорости смещения среды и плотности потока сейсмической энергии с удалением от места взрыва (рис. 5). Точками на рис. 5 обозначены расчетные значения величин на расстоянии 5–95 м с шагом в 5 м, сплошными



Сплошная линия – расчет, выполненный для модуля Юнга $E = 3,158$ ГПа; пунктирная – $E = 3,854$ ГПа

Рис. 5. Расчетные зависимости затухания сейсмической волны от взрывного источника: амплитуда скорости смещения среды (а); плотность потока сейсмической энергии (б)

Fig. 5. Calculated dependences of blasting-induced seismic wave decay: PPV amplitude (а); seismic energy flow density (б)

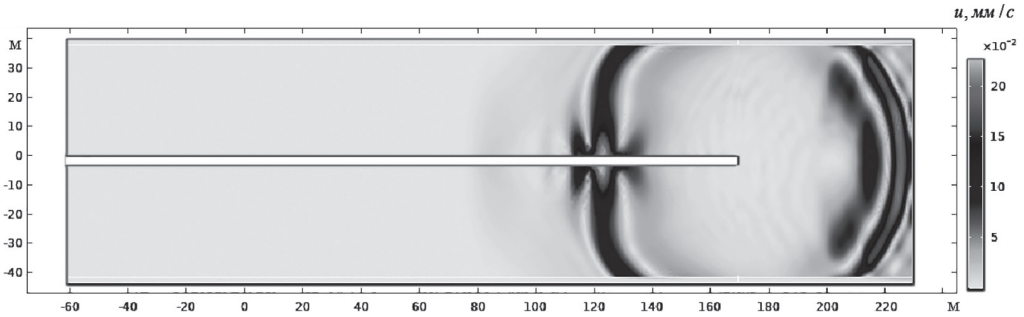


Рис. 6. Волновое поле скорости смещения частиц угля в пласте от взрыва
 Fig. 6. PPV field in coal seam after blasting

и пунктирными линиями — регрессионные кривые, построенные по этим точкам методом наименьших квадратов.

После проведения взрывных работ, когда размер целиковой зоны не превышал 60 м от места взрыва до конвейерного штрека, отмечался дополнительный выход метана. Зарегистрированная сейсмоприемником максимальная амплитуда скорости смещения угля равна 0,11 мм/с, расчетное значение скорости находится в диапазоне 0,11 — 0,13 мм/с. При этом

амплитуда начальной скорости смещения угля от взрыва на расстоянии 3 м от источника составляет 0,48 мм/с для модуля Юнга $E = 3,854$ ГПа и 0,58 мм/с для модуля Юнга $E = 3,158$ ГПа (рис. 5, а). Плотность потока сейсмической энергии для модуля Юнга, равного 3,158 ГПа и 3,854 ГПа, изменяется незначительно, на рис. 5, б сплошная и пунктирная линии практически совпадают.

Проверку вычисленных параметров выполним в программе ANSYS, для

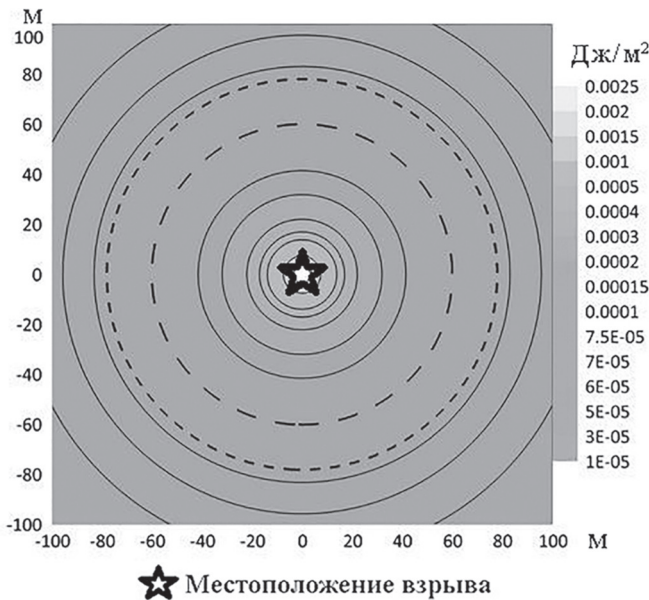


Рис. 7. Распределение плотности потока сейсмической энергии от расположения источника взрыва
 Fig. 7. Seismic energy flow density versus blast source location

этого зададим параметры угольного пласта и выработки, схематически показанной на рис. 3. Подставим найденное среднее значение начальной амплитуды скорости смещения в месте взрыва — 0,53 мм/с для волны частотой $f_0 = 31,5$ Гц в выражение импульса Риккера и выполним моделирование волнового поля скорости смещения частиц угля в момент времени, соответствующий подходу взрывной волны к границе выработки (рис. 6). Время прихода взрывной волны составляет 0,059 с.

Пиковое значение амплитуды скорости смещения частиц угля на контуре выработки составило 0,11 мм/с, что соответствует максимальной величине скорости, зарегистрированной сейсμοприемником. Следовательно, предложенный расчет можно применять для определения параметров сейсмического воздействия на метанонасыщенный угольный пласт для его дегазации.

По результатам вычислений распространения упругих волн в угле найдем изменение плотности потока энергии как функции расстояния от места взрыва. Для этого «поместим» взрывной источник в начало координат так, как показано на рис. 7 и определим скорость смещения частиц угля и плотность потока энергии на расстоянии до 100 м. Пунктирными линиями обозначим область, в которой плотность потока сейсмической энергии достаточна для дополнительного газовыделения, для данного случая она составляет 60–80 м от источника.

На основании проведенных измерений и предложенных расчетов определен радиус дегазации угольного массива в зависимости от начально создаваемой амплитуды колебаний и плотности потока сейсмической энергии, который может применяться для нахождения параметров сейсмического воздействия на метанонасыщенный угольный пласт и обоснования технологии его дегазации.

Выводы

Максимальная амплитуда скорости смещения угля, зарегистрированная на шахте «Бутовская» при взрыве, совпадает с расчетным значением на удалении около 60–70 м от места взрыва, и на этом расстоянии датчиками газового контроля зафиксирован дополнительный дебит газа в горные выработки.

Спектральным анализом сигналов скорости смещения угля от взрывного источника установлено наличие частоты основной гармоники в распространяющейся по угольному пласту сейсмической волне в окрестности 31,5 Гц.

При плотности потока сейсмической энергии, равной $1,5 \times 10^{-3}$ Дж/м², в угольном массиве наблюдается выход дополнительного объема метана в горную выработку до 10%.

Для нахождения параметров вибро-волнового воздействия на метанонасыщенный угольный пласт и обоснования технологии его дегазации предложен расчет определения зоны дополнительного газовыделения в зависимости от амплитуды сейсмического колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

16. Шемякин Е. И. Динамические задачи теории упругости и пластичности. — Новосибирск: НГУ, 1968. — 338 с.
17. Шубин В. П. К вопросу об исследовании физико-механических свойств некоторых пород каменного угля шахт Кузбасса // Известия Томского политехнического института. — 1951. — Т. 68. — № 1. — С. 130–170. **ГИДБ**

REFERENCES

1. Kurlenya M. V., Tsupov M. N., Savchenko A. V. Influence of the bachatsky earthquake on methane emission in roadways in coal mines. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, no. 5, pp. 695–700. DOI: 10.1134/S1062739119056051.
2. Li T., Cai M. F., Cai M. Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines. A km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine. *International Journal of Coal Geology*. 2007, vol. 71, pp. 209–224. DOI: 10.1016/j.coal.2006.08.004.
3. Lia T., Cai M. F., Cai M. A review of mining-induced seismicity in China. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2007, vol. 44, pp. 1149–1171. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.06.002.
4. Si G., Durucan S., Jamnikar S., Lazar J., Abraham K., Korre A., Shi Ji-Q., Zavšek S., Mutke G., Lurka A. Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams. *International Journal of Coal Geology*. 2015, vol. 149, pp. 41–54. DOI: 10.1016/j.coal.2015.06.016.
5. Wen Z., Wang X., Tan Y., Zhang H., Huang W., Li Q. A study of rockburst hazard evaluation method in coalmine. *Shock and Vibration*. 2016, vol. 2016, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/8740868.
6. Luxbacher K. D., Erdogan S. S., Karacan C. Ö. Modeling methane emissions and ventilation needs by examination of mining induced permeability changes and related damage to ventilation controls. *43rd U.S. Rock Mechanics Symposium / 4th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*. 2009, Ashland, North Carolina. 2009, pp. 1–8.
7. Rojstaczer S., Wolf S. Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California. *Geology*. 1992, vol. 20, no. 3, pp. 211–214. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0211:PCAWLE>2.3.CO;2.
8. Shi Zh., Wang Zh., Zuochen G. Quantitative assessment of the mechanisms of earthquake-induced groundwater-level change in the MP well, Three Gorges area. *Pure and Applied Geophysics*. 2018, vol. 175, no. 7, pp. 2475–2484. DOI: 10.1007/s00024-017-1643-6.
9. Cao P., Liu J., Leong Y.-K. General gas permeability model for porous media: bridging the gaps between conventional and unconventional natural gas reservoirs. *Energy & Fuels*. 2016, vol. 30, no. 7, pp. 5492–5505. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b00683.
10. Qi Q., Zhang L., Zuo Sh., Sun Z., Deng K., Bi R., Cao Y. Modelling and simulation of earthquake-induced changes in methane emission from the working face in an underground coal mine. *The Journal of Engineering*. 2021, pp. 1–12. DOI: 10.1049/tje2.12119.
11. Harpalani S., Chen G. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal. *Geotechnical & Geological Engineering*. 1997, vol. 15, no. 4, pp. 303–325. DOI: 10.1007/BF00880711.
12. Bell J. S. In-situ stress and coal bed methane potential in Western Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. 2006, vol. 54, no. 3, pp. 197–220. DOI: 10.2113/gscpgbull.54.3.197.
13. Wang G. X., Massarotto P., Rudolph V. An improved permeability model of coal for coal-bed methane recovery and CO₂ geosequestration. *International Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 77, no. 1–2, pp. 127–136. DOI: 10.1016/j.coal.2008.10.007.
14. Kurlenya M. V., Tsupov M. N., Savchenko A. V., Pugachev K. A. Effect of blasting on methane drainage in coal seam. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 56, no. 5, pp. 793–796. DOI: 10.1134/S1062739120057129.
15. Fedorchenko I. A., Fedorov A. V. Gas-dynamic stage of the coal and gas outburst with allowance for desorption. *Journal of Mining Science*. 2012, vol. 48, no. 1 pp. 15–26. DOI: 10.1134/S1062739148010030.
16. Shemyakin E. I. *Dinamicheskie zadachi teorii uprugosti i plastichnosti* [Dynamic problems of the theory of elasticity and plasticity], Novosibirsk, NGU, 1968, 338 p.

17. Shubin V. P. To the question of the study of physical and mechanical properties of some rocks of coal mines of Kuzbas. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1951, vol. 68, no. 1, pp. 130–170. [In Russ].

18. Nielsen P. *Numerical modelling of seismic waves: on the elimination of grid artifact*. Bergen, Norway, 1994. 47 p.

19. Bérenger J. P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*. 1994, vol. 114, pp. 185–200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курленя Михаил Владимирович¹ — академик РАН,

д-р техн. наук, профессор,
научный руководитель ИГД СО РАН,
ORCID ID: 0000-0003-2610-8434,

Цупов Михаил Николаевич¹ — ведущий инженер,
e-mail: lion_ltd@mail.ru,

Савченко Андрей Владимирович¹ — канд. техн. наук,
доцент, зав. отделом, e-mail: sav@eml.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8458-1487,

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

Для контактов: Савченко А.В., e-mail: sav@eml.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M. V. Kurlenya¹, Academician
of Russian Academy of Sciences,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Supervisor
of Institute of Mining of SB RAS,
ORCID ID: 0000-0003-2610-8434,

M. N. Tsupov¹, Leading Engineer,
e-mail: lion_ltd@mail.ru,

A. V. Savchenko¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Head of Department,
e-mail: sav@eml.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8458-1487,

¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: A. V. Savchenko, e-mail: sav@eml.ru.

Получена редакцией 27.04.2022; получена после рецензии 28.07.2022; принята к печати 10.08.2022.

Received by the editors 27.04.2022; received after the review 28.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.

