

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ С ТЕХНОЛОГИЕЙ УПРАВЛЕНИЯ КРОВЛЕЙ ПОЛНЫМ ОБРУШЕНИЕМ И ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

И.Э. Мазина, А.А. Стельмахов, Л.Ф. Муллагалиева

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва;
² Карагандинский государственный технический университет, Казахстан

Аннотация: При освоении угольного месторождения, именно технология добычи угля определяет масштабы и последствия негативного воздействия. Изменение напряженно-деформированного состояния геосреды может привести к нарушению гидрологического режима, повышенному газовыделению из вмещающих пород, инициации процессов газодинамических явлений. Выбор технологии управления кровлей как геотехнологический метод управления природно-технической системой определяет экологичность угледобычи и формирует условия безопасности. Рассмотрена технология управления кровлей при добыче угля. Для этого выполнено математическое моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния призабойной части угольного пласта для условий шахты им. С.М. Кирова. В результате моделирования были проанализированы две технологии управления кровлей – полным обрушением и закладкой выработанного пространства. Для отработанных очистных лав, заполненных либо обрушенными породами, либо закладочным материалом, проявляются характерные зоны разгрузки в подрабатываемом и надрабатываемом массиве, а также зоны опорного давления, приходящиеся на части целиков, сопряженные с лавой. Было выявлено, что при применении технологии закладки выработанного пространства создаются условия для минимизации гравитационных напряжений в геосреде, также значительно снижается потенциальная энергия формоизменения.

Ключевые слова: математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, НДС, угольный пласт, призабойная зона, управление кровлей обрушением, закладка выработанного пространства, закладка.

Для цитирования: Мазина И.Э., Стельмахов А.А., Муллагалиева Л.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния очистного забоя с технологией управления кровлей полным обрушением и закладкой выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6-1. – С. 99–106. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-99-106.

Modeling of the stress-state longwall face during coal mining with the technology of roof management complete drop and stowing

I.E. Mazina, A.A. Stel'makhov, L.F. Mullagalieva

¹ National university of science and technology «MISIS», Moscow, Russia;
² Karaganda State Technical University, Kazakhstan

Abstract: Underground mining of coal deposits has a negative impact on all components of the environment. When developing a coal deposit, it is coal mining technology that determines the scale and consequences of the negative impact. Changes in the stress-strain state of the geo-environment can lead to a violation of the hydrological regime, increased gas emission from the host rocks, the initiation of gas-dynamic processes. Choice of roofing management technology – as a geotechnological method of natural and technical system management determines the environmental friendliness of coal mining and creates safety conditions. The article deals with the technology of roofing control during coal production. For this purpose mathematical modeling and analysis of stress-strain state of the bottomhole part of the coal bed for the conditions of S.M. Kirov is performed. As a result of modeling, two technologies of roof control were analyzed – complete caving and stowing. For the worked out clearing leaves filled with either caving rocks or stowing material, there are characteristic unloading zones in the massif to be worked and overworked, as well as pressure reference zones, which fall on the parts of the pillars associated with the lava. It was found out that the application of the stowing technology creates conditions for minimization of gravitational stresses in the geo-environment, as well as significantly reduces the potential energy of form change.

Key words: mathematical modeling, stress-strain state, SSS, coal seam, longwall face, full caving technology, technology with backfilling, backfilling.

For citation: Mazina I.E., Stel'makhov A.A., Mullagalieva L.F. Modeling of the stress-state longwall face during coal mining with the technology of roof management complete drop and stowing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6-1):99-106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-99-106.

Введение

Уровень негативного воздействия на окружающую среду при подземной разработке угольных месторождений в основном определяется принятым способом управления горным давлением. Высокий уровень экологического воздействия при подземной угледобыче в настоящее время определяется тем, что, как правило, используется полное обрушение пород кровли [1]. В результате подработки углепородного массива происходит его разгрузка, кардинально возрастает проницаемость массива, что приводит к интенсификации процессов массопереноса всех флюидов. Важнейшее значение для оценки этих процессов имеют масштабы и характер изменения проницаемости. Оценке размеров зон влияния горной выработки на вмещающий массив посвящено большое количество исследований [2–3]. Как правило, выделяют зоны: обрушения, полных сдвижений, разгрузки и опор-

ного давления, а также зону сдвижений пород и земной поверхности, которые зависят от вынимаемой мощности пласта (m) и глубины разработки (H). Однако значительный разброс величин этих зон по разным источникам снижает ценность выполненных исследований и затрудняет корректное их применение в первую очередь при прогнозе метанообильности.

Использование данного способа управления горным давлением связано с преобладанием столбовой системы разработки, при которой длина столба достигает нескольких километров, а длина лавы на наиболее производительных участках превышает 400 м, в основном составляя около 200 м. Данные показатели являются результатами концентрации и интенсификации горных работ.

Выполним оценку напряженно-деформированного состояния (НДС) призабойной зоны угольного пласта,

следуя методологической схеме, приведенной в [4].

Построение модели очистного забоя

В расчетной модели рассмотрим углепородный массив с размерами $400 \times 400 \times 40$ м, при глубине залегания угольного пласта 600 м (рис. 1). Начальное вертикальное горное давление в кровле пласта в соответствии с усредненными физико-механическими характеристиками вмещающих пород составляет $\sigma_{yy} = 14$ МПа, вынимаемая мощность составляет 2 м.

Параметры добычного участка в рассматриваемой модели следующие: лава длиной 300 м расположена между целиками шириной 50 м. Расчетная длина выработанного пространства — 200 м с учетом краевых эффектов, 170 м заполнены обрушенными породами. Величину зоны обрушения приемем как учетверенную вынимаемую мощность, т.е. 8 м, и в этом диапазоне при отработке угля массив представлен разрушенным материалом с пониженной несущей способностью и практически полной проницаемостью. Примакающие к очистному забою 30 м выработанного пространства в соответствии с теорией А.А. Борисова ничем не заполнены. Распорное усилие механизированной крепи прикладывается вдоль всего забоя (300 м) и имеет ширину 3 м и составляет 1,0 МПа, что в среднем соответствует практике эксплуатации очистных комплексов.

В качестве варианта сравнения рассмотрена камерная отработка угольного пласта с длиной 50 м и целиками между ними по 5 м. При разработке угольного пласта, сначала отрабатываются камеры 1-й очереди (возможна отработка нескольких камер одновременно). Далее происходит закладка камер литыми твердеющими материа-

лами. Физико-механические свойства закладочного материала, а именно бетона марки В25, соответствуют СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» [5].

Физико-механические свойства принимались для четырех типов элементов модели — обрушенные горные породы, породы вмещающего массива, угольный пласт, закладочная смесь. Все физико-механические характеристики модели приведены в табл. 1.

В результате расчетов выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния представленной модели. Предметом анализа являются компоненты тензора напряжений ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$) и интенсивности напряжений σ_i в области призабойного пространства (красная область на рис. 1).

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния

Моделирование напряженно-деформированного состояния проводится на основе метода конечных элементов в 3D постановке по методологии, приведенной в работах [6, 7]. Выбор метода конечных элементов как метода вычислений обусловлен физическими соображениями, обеспечивающими условия минимизации полной потенциальной энергии деформации для всего массива, а также эффективностью реализации математических вычислений. Напряженное состояние в модели складывается из гравитационных, тектонических и напряжений бокового отпора [8]. Геологическая среда модели принимается изотропно-упругой. Соотношения между напряжениями и деформациями принимаются по обобщенному закону упругости Гука:

$$\sigma_{ij} = D_{ij} \times \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений.

Таблица 1

Физико-механические свойства модели
Physical and mechanical properties of the model

Свойства	Размерность	Значение
Модуль Юнга обрушенных горных пород	МПа	$8 \cdot 10^1$
Модуль Юнга закладочной смеси	МПа	$3 \cdot 10^4$
Модуль Юнга вмещающего массива	МПа	$8 \cdot 10^3$
Модуль Юнга угля	МПа	$5 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона обрушенных горных пород	—	0,2
Коэффициент Пуассона закладочной смеси	—	0,22
Коэффициент Пуассона вмещающего массива	—	0,27
Коэффициент Пуассона угля	—	0,17
Средняя плотность обрушенных горных пород	кг/м ³	2 300
Средняя плотность закладочной смеси	кг/м ³	2 600
Средняя плотность вмещающего массива	кг/м ³	2 400
Средняя плотность угля	кг/м ³	1 300

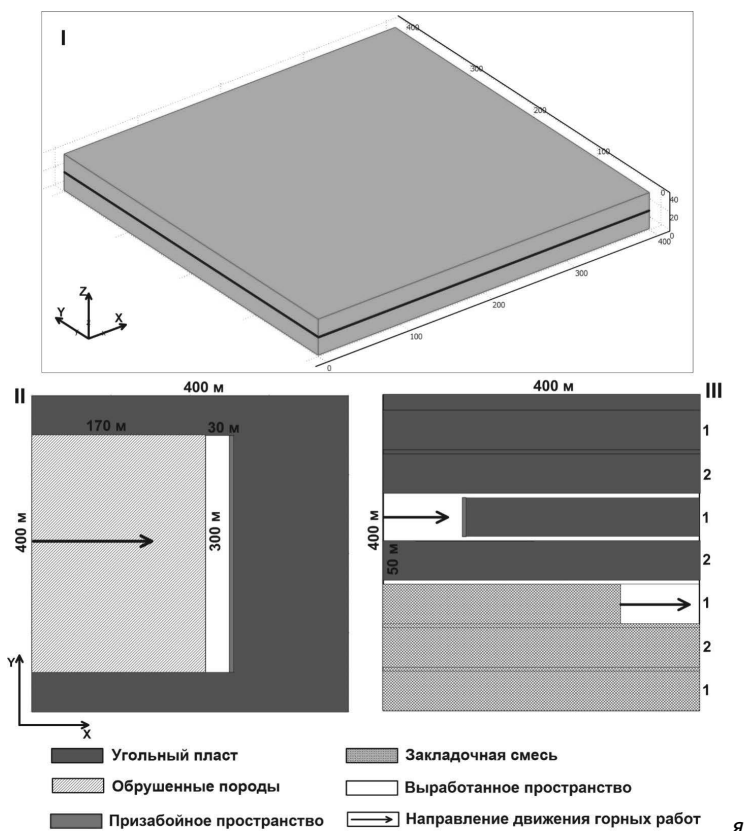


Рис. 1. Геометрическая модель: I – вид геометрической модели в 3D; II – модель с технологией управления кровлей полным обрушением; III – модель с технологией управления кровлей закладкой выработанного пространства, 1 – камеры первой очереди отработки, 2 – камеры второй очереди отработки

Fig. 1. Geometric model: I – view a geometric model in 3D; II – a model of technology control roof complete collapse; III – model with the technology of roof laying-out space, 1 – chamber of the first stage of this work, 2 – the camera of the second phase of testing

$$\sigma_{ij} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

ε_{ij} — компоненты тензора упругих деформаций:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0,5\varepsilon_{xy} & 0,5\varepsilon_{xz} \\ 0,5\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0,5\varepsilon_{yz} \\ 0,5\varepsilon_{xz} & 0,5\varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

$D(\mu, E)$ — матрица упругих коэффициентов, для изотропного материала, где μ — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга, МПа.

Напряжение бокового отпора принимается по А.Н. Диннику как:

$$\sigma_{yy} = \sigma_{xx} = \sigma_{zz} \cdot \frac{\mu}{1-\mu}. \quad (4)$$

Гравитационные напряжения задают вес столба горной породы:

$$\sigma_{zz} = \rho g H, \quad (5)$$

где ρ — плотность горных пород, кг/см³; g — ускорение свободного падения, м/с²; H — глубина от поверхности земли, м.

Интенсивность напряжений рассчитывается по формуле:

$$\sigma_i = (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} + 3 \cdot \sigma_{xy}^2)^{1/2}. \quad (6)$$

Потенциальная энергия формоизменения объема геологической среды рассчитывается по формуле:

$$U_\phi = \frac{1+\mu}{3 \times E} \times \sigma_i^2 \Delta V, \quad (7)$$

где ΔV — объем.

Для проведения сравнительного анализа вычислим по формуле (8) компоненты напряжений и энергию формоизменения по объему призабойной зоны:

$$\sigma(\Delta V) = \iiint_V \sigma dx dy dz, \quad (8)$$

где σ — значение компоненты тензора напряжений; ΔV — объем призабойной зоны; X, Y, Z — координатные оси: $x = 5$ м — ширина призабойной зоны; $z = 2$ м — высота призабойной зоны; $y = 50$ и 300 м — длина призабойной зоны (для технологии обрушения кровли и технологии закладки выработанного пространства соответственно).

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

В результате моделирования можно сделать вывод, что призабойная часть угольного пласта испытывает всеосное сжатие, которое на порядок выше при технологии полного обрушения горных пород, чем при использовании технологии закладки выработанного пространства. Касательные напряжения в модели технологии закладки на порядок ниже, чем в модели управления кровлей полным обрушением. Потенциальная энергия формоизменения забоя в модели управления кровлей полным обрушением примерно в 6 раз выше, чем в модели технологии закладки.

Заключение

Общие закономерности изменения напряжений связаны с проявлением областей повышенного горного давления в углепородном массиве. Для моделей выработанных пространств угольного пласта, заполненных закладочным материалом или обрушенными горными породами, характерны зоны разгрузки и зоны опорного давления, приходящиеся на части целиков, сопряженные с лавой. Перераспределение напряжений в геологической среде приводит к изменению гидрологического режима, повышению газовой выделению, интенсификации процессов газодинамических явлений [9–16].

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния

Таблица 2

Результаты количественной оценки напряженного состояния по объему призабойной зоны
Results of quantitative assessment of the stress state by the volume of the bottom hole zone

Параметр	Технология управления кровлей	
	Полное обрушение кровли	Закладка выработанного пространства
σ_{xx}	$4,47 \cdot 10^3$	$6,99 \cdot 10^2$
σ_{yy}	$3,05 \cdot 10^3$	$4,33 \cdot 10^2$
σ_{zz}	$1,61 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^3$
τ_{xy}	$-4,85 \cdot 10^1$	-6,68
τ_{xz}	$-4,04 \cdot 10^4$	$-5,19 \cdot 10^3$
τ_{yz}	$-7,19 \cdot 10^1$	$-4,99 \cdot 10^1$
σ_i	$1,47 \cdot 10^4$	$2,42 \cdot 10^3$
Потенциальная энергия формоизменения, МДж/м ³		
U_ϕ	554,4	90

призабойной зоны угольного пласта показывает, что применение технологии управления кровлей закладкой выработанного пространства создает условия

для уменьшения зон повышенных напряжений в геологической среде, и при этом значительно снижается потенциальная энергия формоизменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kolikov K.S., Manevich A.I., Mazina E.I.*, Stress-strain analysis in coal massif under traditional mining with full caving and in technology with backfilling // Eurasian mining. – 2018. – №2. – p. 15 – 17. DOI: 10.17580/em.2018.02.04.
2. *Pytel W., Świtoń J., Wójcik A.*, The effect of mining face's direction on the observed seismic activity // International Journal of Coal Science & Technology. – 2016. – Vol. 3. – Iss. 3. – p. 322–329, DOI: 10.1007/s40789-016-0122-5.
3. *Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X.*, Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // International Journal of Coal Science & Technology. – 2017. – Vol. 4. – Iss. 2. – p. 129–146. DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6.
4. *Маневич А. И., Макаров В. А., Пащенко П. Н.* Перспективы математического моделирования как составной части геомеханического мониторинга на шахтах с целью повышения эффективности управления газовойделением // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №6. – С. 91–100;
5. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 [Электронный ресурс]. Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. N 635/8. Доступ из справочно-правовой системы: <http://docs.cntd.ru/>.
6. *Баклашов И.В.* Геомеханика. Учебник для вузов. Основы геомеханики. – М.: Издательство МГГУ. – 2005. – 208 с.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Теория упругости. 4-е изд., М.: Наука, 1987. – 248 с.;
8. *Егорова Е.А., Коликов К.С., Мегид Х.А.* Оценка проницаемости угольного пласта с учетом неоднородности в геологической структуре кровли // Горный журнал. – 2016. – № 6. – с. 56-59.

9. *Сластунов С.В., Коликов К.С., Ермак Г.П., Ютяев Е.П.* Решение проблемы безопасности угледобычи в долгосрочной программе развития отрасли // Горный журнал. — 2015. — № 4. — с. 46-49.
10. *Conte E., Troncone A., Vena M.* A method for the design of embedded cantilever retaining walls under static and seismic loading // *Géotechnique*. — 2017. — Vol. — 67. — Iss. 12. — p. 1081–1089. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.201.
11. *Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Коликов К. С.* Управление аэрологическими рисками при проектировании, эксплуатации, ликвидации и консервации угольных шахт// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 85–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94.
12. *Manevich A.I., Kolikov K.S., Egorova E.A.*, Geocological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia) // *Russian Journal of Earth Science*. — 2019. — №19. — ES4002. DOI:10.2205/2019ES000663.
13. *Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S.* Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // *Eurasian mining*. 2019. — №2. — p. 19 — 22. DOI: 10.17580/em.2019.02.03.
14. *Опарин В.Н.* К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 2. С. 3-19.
15. *Еременко А.А., Машуков И.В., Еременко В.А.* Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 1. С. 70-76.
16. *Павленко М.В., Скопинцева О.В.* О роли капиллярных сил при вибровоздействии на гидравлически обработанный газонасыщенный угольный массив // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2019. — № 3. — С. 43-50. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-43-50. **MIAB**

REFERENCES

1. *Kolikov K.S., Manevich A.I., Mazina E.I.*, Stress-strain analysis in coal massif under traditional mining with full caving and in technology with backfilling. *Eurasian mining*. 2018. no. 2. pp. 15–17. DOI: 10.17580/em.2018.02.04.
2. *Pytel W., Świtoń J., Wójcik A.*, The effect of mining face's direction on the observed seismic activity. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2016. Vol. 3. Iss. 3. pp. 322–329, DOI: 10.1007/s40789-016-0122-5. [In Russ]
3. *Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X.*, Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2017. Vol. 4. Iss. 2. p. 129–146. DOI: 10.1007/s40789-017-0161-6. [In Russ]
4. *Manevich A. I., Makarov V. A., Pashchenkov P. N.* Prospects of mathematical modeling as an integral part of geomechanical monitoring in mines with the purpose of increasing the efficiency of gas release control. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017. no. 6. pp. 91–100; [In Russ]
5. *SP 63.13330.2012* Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 52-01-2003 [Elektronnyj resurs]. Prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossijskoj Federacii (Minregion Rossii) ot 29 dekabrya 2011 g. № 635/8. Dostup iz spravочно -pravovoj sistemy: <http://docs.cntd.ru/>. [In Russ]
6. *Baklashov I.V.* *Geomekhanika* [Geomechanics. Fundamentals of geomechanics]. Uchebnik dlyavuzov. Osnovy geomekhaniki. MGGU: Moscow. 2005. 208 p. [In Russ]
7. *Landau L.D., Lifshic E.M.* *Teoreticheskaya fizika. Teoriya uprugosti* [Theoretical Physics. Theory of elasticity]. 4-e izd., Moscow: Nauka. 1987. 248 p. [In Russ]
8. *Egorova E.A., Kolikov K.S., Megid H.A.* Coal seam permeability assessment considering geological structure no. nuniformity in the roof. *Gornyj zhurnal*. 2016. no. 6. pp. 56–59. [In Russ]

9. Slastunov S.V., Kolikov K.S., Ermak G.P., Yutyaev E.P. Safety of coal mining in long-run development. *Gornyj zhurnal*. 2015. no. 4. pp. 46–49. [In Russ]
10. Conte E., Troncone A., Vena M. A method for the design of embedded cantilever retaining walls under static and seismic loading. *Géotechnique*. 2017. Vol. 67. Iss. 12. pp. 1081–1089. DOI: 10.1680/jgeot.16.P.201.
11. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kolikov K. S. Aerological risk management in designing, operation, closure and temporary shutdown of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6):85-94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-85-94.
12. Manevich A.I., Kolikov K.S., Egorova E.A. Geoecological aspects of stress-strain state modeling results of Leninsky coal deposit (Kuzbass, Russia). *Russian Journal of Earth Science*. 2019. no. 19. ES4002. DOI:10.2205/2019ES000663. [In Russ]
13. Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect. *Eurasian mining*. 2019. no. 2. p. 19 22. DOI: 10.17580/em.2019.02.03.
14. Oparin V.N. Theoretical fundamentals to describe interaction of geomechanical and physicochemical processes in coal seams. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017. no 2. pp. 3–19. [In Russ]
15. Eremenko A.A., Mashukov I.V., Eremenko V.A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in Gornaya Shoria. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017. no 1. pp. 70–76. [In Russ]
16. Pavlenko M. V., Skopintseva O. V. Role of capillary forces in vibratory action on hydraulically treated gas-saturated coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. No. 3. pp. 43–50. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-43-50. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мазина Ирэна Эдуардовна*¹ — ведущий инженер кафедры «Безопасность и экология горного производства», e-mail: edik-mazin@yandex.ru;

*Стельмахов Андрей Анатольевич*¹ — канд. экон. наук, доцент кафедры «Безопасность и экология горного производства»;

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский пр., 4, Москва, 119049;

Муллагалиева Лилия Фандусовна — докторант Карагандинского государственного технического университета, Казахстан.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mazina I.E.*¹, chief engineer, e-mail: edik-mazin@yandex.ru;

*Stelmakhov A.A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department «Safety and Ecology of Mining Production»;

¹ National university of science and technology «MISIS», Russia;

Mullagalieva L.F., associate professor, Karaganda State Technical University, Kazakhstan.

Получена редакцией 11.03.2020; получена после рецензии 14.04.2020; принята к печати 20.05.2020.

Received by the editors 11.03.2020; received after the review 14.04.2020; accepted for printing 20.05.2020.

