

УДК 622.817

ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В ГРАНИЦАХ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА ШАХТЫ

Д. М. Борzych, А. М. Никитина, С. В. Риб, Е. М. Кузив

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Для обоснования параметров проветривания выработок выемочного участка одной из шахт (Распадское каменноугольное месторождение) определена остаточная газоносность угольного пласта 6-ба комплексным методом. Рассматриваемый метод включает отбор угольных проб из скважин в шахтных условиях, оценку в лабораторных условиях скорости десорбции метана и коллекторских свойств 18 угольных кернов, численное моделирование распределения газопроницаемости, пористости и давления метана в угольном пласте.

Ключевые слова: остаточная газоносность угольного массива, дегазация, отбор угольных проб, угольный керноотборник, газоносность угольных пластов, десорбция метана, коллекторские свойства угольных кернов

Для цитирования: Борzych Д.М., Никитина А.М., Риб С.В., Кузив Е.М. Оценка газоносности угольного пласта в границах выемочного участка шахты // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2021. № 3 (37). С. 37 – 44.

ESTIMATION OF GAS CONSUMPTION OF A COAL SEAM IN THE BOUNDARIES OF THE MINE EXTRACTION FACE

D. M. Borzykh, A. M. Nikitina, S. V. Rib, E. M. Kuziv

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. To substantiate parameters of ventilation of extraction face of one of the mines (the Raspadskoe coal deposit), residual gas content of 6-6a coal seam has been determined using an integrated method. The method under consideration includes taking coal samples from wells in mine conditions, evaluating in laboratory conditions the rate of methane desorption and reservoir properties of 18 coal cores, numerical modeling of distribution of gas permeability, porosity and pressure of methane in a coal seam.

Keywords: residual gas content of the coal massif, gas draining, coal sampling, coal core barrel, gas content of coal seams, methane desorption, collector properties of coal cores.

For citation: Borzykh D.M., Nikitina A.M., Rib S.V., Kuziv E.M. Estimation of gas consumption of a coal seam in the boundaries of the mine extraction face // Bulletin of SibSIU. 2021, no. 3 (37), p. 37–44. (In Russ.).

При внедрении инновационных технологических решений для подземной разработки угольных месторождений на шахтах Кузбасса с потенциальной нагрузкой на очистной комплексно-механизированный забой (КМЗ) более 15 тыс. т/сутки возможность использования современной высокопроизводительной горной техники и прогрессивных форм организации труда сдерживает-

ся газовым фактором (выделение метана в выработках выемочных участков до 90 м³/мин).

Согласно результатам теоретических исследований ученых ведущих научно-исследовательских организаций и вузов установлено, что на процесс миграции метана из угольного пласта или горной массы влияют следующие основные факторы [1]:

- природная метаноносность пласта в виде свободного, сорбированного и химически связанного с углем метана;
- пористость, проницаемость и фильтрационные характеристики угольного пласта и вмещающих пород;
- напряженно-деформированное состояние массива горных пород;
- глубина разработки, мощность отрабатываемого пласта и пластов-спутников в свите;
- форма и размеры подготовительной выработки;
- параметры геологических нарушений;
- результаты газовоздушных съемок в тупиках пластовых подготовительных выработок.

Анализ горно-геологических условий залегания угольных пластов Кузбасса показал, что значительная часть пластов высокогазоносна. Рассматриваемый фактор снижает эффективность применения дорогостоящего проходческого и очистного оборудования, а также ухудшается безопасность работ. Одним из способов снижения негативного влияния метана является дегазация угольных пластов [2 – 9].

С целью обоснования параметров проветривания выработок выемочного участка одной из шахт на Распадском каменноугольном месторождении, повышения эффективности дегазации угольного пласта 6-6а проведена оценка остаточной газоносности угольного массива в границах выемочного участка.

Характеристика пласта 6-6а

Угольный пласт сложного строения, содержит 2 – 6 породных прослоев, сложенных мелкозернистыми алевролитами (реже углистыми алевролитами), суммарной средней мощностью 0,25 м. Мощность пласта в среднем составляет 4,52 м. Средняя мощность чистых угольных пачек – 4,27 м. Коэффициент f крепости угля составляет 0,8 – 1,0; предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ – 13,5 МПа; коэффициент f крепости породных прослоев – $3 \div 4$. По своим качественным показателям уголь пласта 6-6а относится к марке ГЖ и характеризуется следующими показателями: зольность общепластовая 14,5 %; зольность чистых угольных пачек 8,2 %; толщина пластического слоя 24 – 26 мм; выход летучих веществ 36,9 %; влажность 3,3 %; объемный вес угольного пласта и чистых угольных пачек 1,37 и 1,31 т/м³.

Непосредственная кровля пласта представлена темно-серыми мелкозернистыми и крупнозернистыми алевролитами массивными до слабослоистых, переслаиванием алевролитов. Слоистость пологоволнистая и косая

прерывистая, за счет изменения гранулометрического состава и цвета. По всему слою отпечатки растений разной сохранности, присутствуют прослои песчаников, прожилки кальцита, борозды, зеркала скольжения. Содержат плоскости наложения, обогащенные углефицированными растительными остатками. Мощность алевролитов составляет 25 – 40 м, коэффициент f крепости 3 – 5; предел прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) 30 – 50 МПа.

Непосредственная кровля средней устойчивости, относится ко II классу по устойчивости, I типу по обрушаемости (вне зоны влияния тектонических нарушений).

При ведении горных работ на большей части выемочного участка ожидается «ложная кровля» мощностью 0,1 – 0,5 м, реже до 1,0 м, представленная алевролитами углистыми или тонкослоистыми мелкозернистыми алевролитами с многочисленными включениями растительного детрита и слоев угля. Ложная кровля весьма неустойчивая, обрушается в призабойное пространство сразу вслед за выемкой угля.

Основная кровля сложена серыми, темно-серыми песчаниками (от мелкозернистым до крупнозернистым) мощностью от 7 до 18 м и алевролитами мелкозернистыми, крупнозернистыми. В песчаниках проявлена редкая косая, косоволнистая прерывистая слоистость за счет растительного детрита. Присутствуют единичные гальки, прослои алевролитов. Коэффициент f крепости составляет 6 – 7, предел прочности при сжатии ($\sigma_{сж}$) 60 – 70 МПа.

В почве пласта залегают темно-серые крупнозернистые алевролиты, участками мелкозернистые с редкими прослойками песчаников. Присутствуют зеркала, штрихи скольжения в начале слоя. Мощность пород почвы 4 – 8 м. Коэффициент f крепости алевролитов составляет 4 – 5, предел прочности при сжатии 40 – 50 МПа. Алевролиты обладают средней несущей способностью, при значительном увлажнении теряют свои несущие способности. Породы почвы склонны к пучению.

Отбор угольных проб

Отбор угольных проб для оценки остаточной газоносности угля был проведен в соответствии с требованиями руководства по безопасности [10]. С помощью шахтного керноотборника (рис. 1) отобрано 18 угольных проб из шести скважин, пробуренных из подготовительных горных выработок выемочного участка.

Объем проведенных лабораторных исследований составил более 60 измерений выделившегося объема газа из отобранных угольных проб.



Рис. 1. Угольный керноотборник для отбора угольных проб в условиях горных выработок
Fig. 1. Coal core barrel for coal sampling in mine workings

Отбор угольных проб выполнен на участке угольного пласта 6-ба в пределах конвейерного штрека 4-6-39 (пикеты 40, 38, 68, 80, 100, 120). Пробы отбирали из горизонтальных скважин диаметром 100 мм, пробуренных на 25 м в глубь массива, глубина расположения пласта от дневной поверхности 350 м. В каждой скважине отобрано по три угольных керна.

Для оценки остаточной газоносности угля использованы методы оценки скорости десорбции метана (объемный метод) и коллекторских свойств с учетом динамики процессов фильтрации и диффузии метана. Угольные керны из скважин отобраны по пласту от боков горной выработки за пределами зоны опорного давления. Угольные пробы отобраны из дегазационных скважин, пробуренных по простиранию угольного пласта по восстанию и падению. В процессе отбора образцов угля из горных выработок регистрировали время извлечения образцов из скважин, атмосферное давление и температуру окружающей среды.

Угольную пробу из керноприемной части перекладывали в сосуд и герметично закрывали крышкой (рис. 2).

Сосуды с пробами доставляли в лабораторию (АО «ЗСИЦентр», г. Новокузнецк), где их размещали в термостаты, нагретые до температуры угольного пласта далее нагревали до 80 °С. В лабораторных условиях проводили дегазацию угольных проб и определяли технические харак-

теристики угля. По результатам проведенных измерений стандартное отклонение газоносности χ пласта изменяется в пределах 1 – 10 % между пробуренными скважинами длиной до 200 м с доверительной вероятностью 90 % по критерию Стьюдента.



Рис. 2. Герметичный сосуд для отбора проб угля
Fig. 2. Sealed vessel for coal sampling

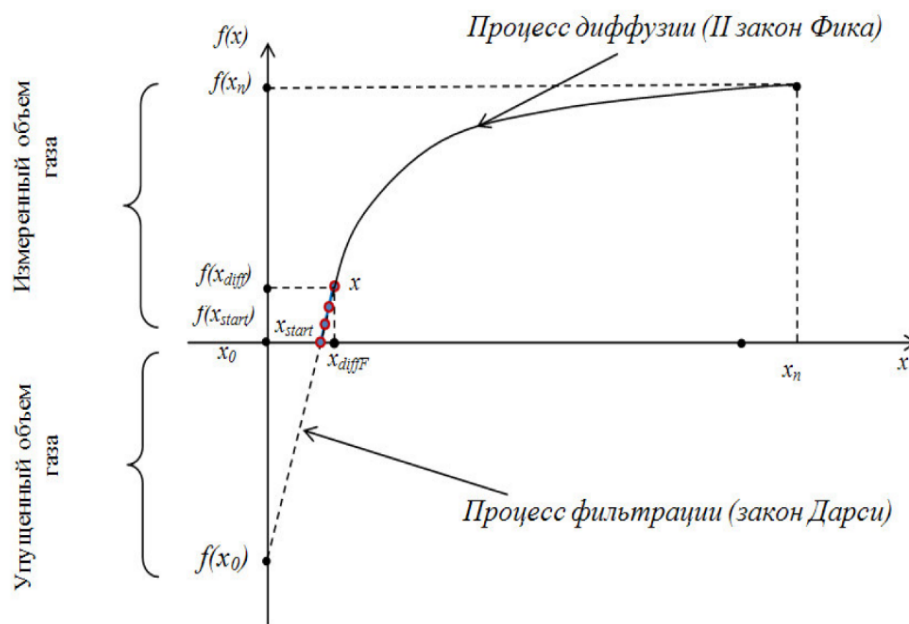


Рис. 3. Зависимость десорбции $f(x)$ метана из угольного образца от времени x
 Fig. 3. Dependence of desorption $f(x)$ of methane from a coal sample on time x

В лабораторных исследованиях упущенный объем газа, характеризующий процесс отбора угольных проб, во время которого выделяется не отбираемый в герметичный сосуд газ, определен методом обратной экстраполяции в момент времени $x = 0$ (здесь и далее $x = \sqrt{t}$, t – время десорбции метана из угля, мин). Объем выделившегося метана на интервале от x_{diff} до x снижается линейно (рис. 3), что характеризуется как процесс фильтрации.

При обработке экспериментальных данных по формуле $y = kx + b$ можно определить положение соответствующей прямой. Газоносность угольных пластов определяли прямыми измерениями десорбции метана в лабораторных условиях на участке десорбционной кривой, соответствующей диффузии метана, с восстановлением упущенного объема газа на линейном участке, описываемом законом Дарси (рис. 3).

В общем случае десорбция метана из угольных проб описывается следующей моделью [11]:

$$f(x) = \begin{cases} a_1 + b_1 x; & x \in [x_0; x_{diff}] \\ a_2 + b_2 x; & x \in [x_{diff}; x_n] \end{cases} \quad (1)$$

где a_1 ; b_1 ; a_2 ; b_2 – параметры модели; $x_0 = 0$; n – количество измерений; x_{diff} – начало диффузии; $[x_0; x_{star}]$ – интервал экстраполяции; $[x_{diff}; x_n]$ – процесс диффузии (закон Фика).

Процесс десорбции метана заключается в его фильтрации (линейный участок), переходящий в диффузию (нелинейный участок) из угольного

образца через систему пор и трещин вследствие увеличения пути внутренней диффузии, проявляется в том, что на длительном интервале объем выделившегося газа убывает обратно пропорционально квадратному корню из времени. По результатам определения остаточной газонасности в последующем может быть выполнена оценка эффективности дегазации угольных пластов на основе применения коэффициента эффективности дегазации.

Для измерения выделяемого объема газа применяли измерительный комплекс. Лабораторные исследования по определению газонасности угля проводили методом десорбции газа в сосуд объемом 1500 – 3000 мл. Измерение десорбируемого объема газа из угольных проб проводили при условии повышения давления в герметичном сосуде до 110 кПа.

Доставленные в лабораторию угольные образцы были размещены в термостаты, поддерживающие температуру угольного пласта. Обработка материалов заключается в определении общего объема газа, содержащегося в угольном образце [11]:

$$V_{\Sigma} = |V_{\text{упущ}}| + V_{\text{ввд}} + V_{\text{ост}} \quad (2)$$

где V_{Σ} – суммарный объем газа, содержащийся в угольном образце; $V_{\text{упущ}}$ – объем упущенного газа, который выделился из угольного образца с момента проникновения рабочего инструмента в область угольного пласта до момента размещения угольного образца в герметичном сосуде; $V_{\text{ввд}}$ и $V_{\text{ост}}$ – выделившийся и остаточный газы.



Рис. 4. Угольный керн, отобранный с помощью шахтного керноотборника
Fig. 4. Coal core sample taken using mine coring machine

Упущенный объем газа определяется методом обратной экстраполяции с учетом выделившегося объема метана в течение времени $\sqrt{t}$ (рис. 3). В лабораторных условиях для исследования десорбции газа и угля использовали полученные угольные керны диам. 40 – 45 мм (рис. 4).

В общем случае значение изменения давления в сосуде зависело от температуры угольного пласта, размера гранул угля, его проницаемости. Измерения выделившегося объема газа при температуре угольного пласта продолжали в течение 24 ч, в последующем температуру увеличивали до 80 °С в течение 80 ч в зависимости от интенсивности газовыделения с момента размещения герметичных сосудов с пробами в термостаты.

К герметичному сосуду с образцом угля подсоединяли газоотводящую трубку. Измерительный цилиндр соединяли с уравнительной емкостью, заполненной водой, при помощи которой давление газа в цилиндре приводили к атмосферному давлению. Затем шаровый кран на герметичном сосуде переводили в открытое положение. Поступающий по газоотводящей трубке газ вытеснял воду, находящуюся в измерительном цилиндре. После того, как уровень воды в измерительном цилиндре прекращал уменьшаться, кран на герметичном сосуде закрывали. По разнице между уровнями в измерительном цилиндре до и после открытия крана определяли объем выделившегося газа.

Первое и второе измерения в лаборатории проводили с интервалом $\Delta t_1 = 480$ мин, последующие – с интервалом, рассчитываемом по формуле [11]:

$$\Delta t_{i+1} = \begin{cases} 2\Delta t & \text{при } V_i \leq V/30; \\ 1,5\Delta t & \text{при } V_i \leq V/15; \\ \Delta t & \text{при } V_i \leq V/15; \end{cases} \quad (3)$$

где V – объем герметичного сосуда, см³; V_i – объем выделившегося газа, см³.

Газоносность Γ угольного образца, вычисляли по следующей формуле:

$$\Gamma = \frac{V_{\Sigma}}{M}, \quad (4)$$

где Γ – газоносность, см³, газа и 1 г горючей массы; M – масса угля, высушенного при комнатной температуре, г.

Газоносность в пересчете на сухую беззольную массу определяли по уравнению

$$\Gamma_{\text{с.б.м}} = \frac{V_{\Sigma}}{p'(100\% - A^a - W^a)}, \quad (5)$$

где A^a и W^a – зольность и влажность угля, %.

В таблице приведены значения газоносности угля, отобранного из горных выработок выемочного участка.

Остаточная газоносность на исследуемом участке составила от 14,45 до 16,34 м³/т с учетом сохранения температурных условий в интервале температур 15 – 20 °С, соответствующим параметрам углепородного массива.

Метод численного моделирования

Для обработки результатов измерений использован метод численного моделирования [12, 13]. На основании результатов расчета остаточной метаноносности пласта и сравнение с измеренной в лабораторных условиях установлено, что вычисленная метаноносность на 19 % больше измеренной по угольным пробам в лаборатории. Полученные отклонения можно объяснить следующими факторами:

- потерей доли метана из угольной пробы в процессе ее обработки;
- пространственным распределением мест взятия проб в пределах пласта 6-6а.

Значение оценки остаточной газоносности угля в пределах выемочного столба 4-6-39 на ПАО «Распадская»

Results of assessing residual gas content of coal within the 4-6-39 extraction pillar at "Raspadskaya" PJSC

Место отбора проб	Проба	Остаточная газоносность угля, м ³ /т с.б.м.
Конвейерный штрек (пикет –40), 20.08.2020, точка 1	КГН № 1	15,19
		15,20
		13,00
Вентиляционный штрек (пикет 80), 26.08.2020, точка 2	КГН № 2	14,74
		13,90
		13,18
Вентиляционный штрек (пикет 68), 02.09.2020, точка 3	КГН № 3	15,24
		15,10
		14,62
Вентиляционный штрек (пикет 38), 08.09.2020, точка 4	КГН № 4	13,61
		15,87
		16,37
Вентиляционный штрек (пикет 100), 14.09.2020, точка 5	КГН № 5	14,70
		15,25
		13,49
Вентиляционный штрек (пикет 120), 22.09.2020, точка 6	КГН № 6	13,82
		14,16
		14,45

Выводы

Исследования остаточной газоносности угольного пласта показали, что угольный пласт в пределах выемочного участка содержит в себе до 18 м³/т газа метана. При таких показателях содержания газа (метана) в массиве работы по ведению очистных и подготовительных работ необходимо вести с применением дегазации пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С. и др. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов. М.: Горная книга, 2010. 500 с.
2. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Вып. 22. М.: ЗАО Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2012. 250 с.
3. Колмаков В.А. Метановыделение и борьба с ним в шахтах. М.: Недра, 1981. 134 с.
4. Ремезов А.В. и др. Дегазация газа метана из угольных пластов и вмещающих пород на шахтах Кузбасса. История. Действительность. Будущее. Кемерово: КузГТУ, 2012. 848 с.
5. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Минуглепром СССР. Макеевка-Донбасс. 1989. 321 с.
6. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Анализ существующих алгоритмов оценки дебитов метана из разрабатываемых пологих пластов с целью определения структуры газового баланса выемочных участков // Наукоемкие технологии разра-

- ботки и использования минеральных ресурсов. 2019. № 5. С. 445–448.
7. Борзых Д.М., Никитина А.М., Риб С.В., Волошин В.А. Разработка технических и технологических решений по совершенствованию дегазации с использованием направленного бурения для условий ООО «Шахта «Усковская». В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Вып. 22. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2018. С. 27–31.
 8. Коряга М.Г. Применение многофункциональных скважин направленного бурения для заблаговременной дегазации и борьбы с самовозгоранием угля при разработке мощных угольных пластов. В кн.: Наукоемкие технологии и использование минеральных ресурсов. Материалы Международной научно-практической конференции. Сборник научных статей. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2012. С. 296–298.
 9. Лукин К.Д., Коряга М.Г. К вопросу об использовании технологии бурения наклонно-горизонтальных скважин в технологической системе угольной шахты современного технического уровня // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. №9. С. 64–67.
 10. Приказ от 09 августа 2016 г. № 333 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Об утверждении Руководства по безопасности «Рекомендации по определению газоносности угольных пластов».
 11. Дубов Г.П. Совершенствование методики расчета газообильности подготовительных выработок по данным газоносности угольных пластов // Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в угольных шахтах. ВостНИИ. 1972. Т. XVII. С. 5–14.
 12. Говорухин Ю.М., Фрянов В.Н., Палеев Д.Ю. Численное моделирование взаимодействующих геомеханических и аэродинамических процессов на выемочном участке // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 2. С. 288–299.
 13. Говорухин Ю.М., Риб С.В., Никитина А.М., Фрянов В.Н. Моделирование численными методами процессов обрушения пород кровли // Горный журнал. 2019. № 4. С. 23.
 14. *gas-bearing coal seams*. Moscow: Gornaya kniga, 2010, 500 p. (In Russ.).
 2. *Instructions for coal mines gas draining. Series 05. Issue. 22*. Moscow: ZAO Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovani problem promyshlennoi bezopasnosti, 2012, 250 p. (In Russ.).
 3. Kolmakov V.A. *Methane emission and control in mines*. Moscow: Nedra, 1981, 134 p. (In Russ.).
 4. Remezov A.V. et al. *Gas draining of methane from coal seams and enclosing rocks in the Kuzbass mines. History. Reality. Future*. Kemerovo: KuzGTU, 2012, 848 p. (In Russ.).
 5. *Guidelines for design of coal mines ventilation of Minugleprom of the USSR. Makeevka-Donbass*. 1989. 321 p. (In Russ.).
 6. Govorukhin Yu.M., Krivolapov V.G., Paleev D.Yu. Analysis of existing algorithms for assessing methane flow rates from developed shallow formations in order to determine structure of gas balance in production areas. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2019, no. 5, pp. 445–448. (In Russ.).
 7. Borzykh D.M., Nikitina A.M., Rib S.V., Voloshin V.A. development of technical and technological solutions to improve gas draining using directional drilling at the Uskovskaya Mine LLC. In: *Science and Youth: Problems, Searches, Solutions. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Issue 22*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2018, pp. 27–31. (In Russ.).
 8. Koryaga M.G. *The use of multifunctional directional drilling wells for early degassing and control of spontaneous combustion of coal in the development of powerful coal seams*. In: *Science-intensive technologies and the use of mineral resources. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Collection of scientific articles*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2012, pp. 296–298.
 9. Lukin K.D., Koryaga M.G. On the issue of using the technology of drilling inclined-horizontal wells in the technological system of a coal mine of modern technical level. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2008, no. 9, pp. 64–67.
 10. *Order No. 333 of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated August 09, 2016. On the approval of the Safety Manual "Recommendations for determining the gas content of coal deposits"*. (In Russ.).

REFERENCES

1. Ruban A.D., Artem'ev V.B., Zaburdyaev V.S. et al. *Preparation and development of high-*

11. Dubov G.P. Improvement of the methodology for calculating the gas content of preparatory workings according to the gas content of coal seams. *Bor'ba s gazom, vnezapnymi vybrosami i pozharami v ugol'nykh shakhtakh. VostNI.* 1972, vol. XVII, pp. 5–14. (In Russ.).
12. Govorukhin Yu.M., Fryanov V.N., Paleev D.Yu. Numerical simulation of interacting geomechanical and aerodynamic processes at the excavation site. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle.* 2019, no. 2, pp. 288–299. (In Russ.).
13. Govorukhin Yu.M., Rib S.V., Nikitina A.M., Fryanov V.N. Modeling of roof rock collapse processes by numerical methods. *Gornyi zhurnal.* 2019, no. 4, pp. 23. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Дмитрий Михайлович Борzych, преподаватель кафедры геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Анастасия Михайловна Никитина, доцент кафедры геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Сергей Валерьевич Риб, к.т.н., доцент кафедры геотехнологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Елена Михайловна Кузив, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors

Dmitrii M. Borzykh, lecturer of the Department of Geotechnology Siberian State Industrial University

Anastasiya M. Nikitina, Associate Professor of the Department of Geotechnology, Siberian State Industrial University

Sergei V. Rib, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geotechnology, Siberian State Industrial University

Elena M. Kuziv, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

© 2021 г. Д.М. Борzych, А.М. Никитина,
С.В. Риб, Е.М. Кузив

Поступила в редакцию 09.09.2021 г.