

УДК 622.277: 622.411.33 © В.С. Бригида¹, А.К. Джиеова², 2024UDC 622.277: 622.411.33 © V.S. Brigida¹, A.K. Dzhiioeva², 2024¹ ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр РАН, 111020, г. Москва, Россия¹ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation² ФГБУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», 362021, г. Владикавказ, Россия² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 362021, Vladikavkaz, Russian Federation

✉ e-mail: 1z011@inbox.ru

✉ e-mail: 1z011@inbox.ru

Определение шага возведения искусственных полос частичной закладки для снижения эмиссии климатически активных газов

Determination of construction step to artificial strips of backfilling fore reduce the emission of climatically active gases

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-4-74-78>**БРИГИДА В.С.**

Канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
лаборатории «Управления
горнотехническими системами»,
ФГБУН Институт проблем
комплексного освоения недр РАН,
111020, г. Москва, Россия,
e-mail: 1z011@inbox.ru

ДЖИОЕВА А.К.

Канд. техн. наук,
доцент кафедры «Горное дело»,
ФГБУ ВО «Северо-Кавказский
горно-металлургический институт
(государственный
технологический университет)»,
362021, г. Владикавказ, Россия

Глобальная задача, стоящая перед отечественной горнодобывающей промышленностью, заключается в обеспечении «декарбонизации» добычи угля для достижения устойчивого развития горного производства. В связи с этим целью работы было совершенствование методологии определения шага возведения искусственных полос частичной закладки для снижения эмиссии климатически активных газов за счет повышения устойчивости подрабатываемых дегазационных скважин. Итогом работы стала апробация методики оценки динамических пространственно-временных изменений концентрации метана при формировании максимального пролета кровли. Кроме того, определено значение предельного состояния пород кровли (150 м), определяющего частоту строительства искусственных сооружений в области выработанного пространства лавы.

Ключевые слова: устойчивая добыча, устойчивость кровли, выбросы метана, газовые потоки, закладка, подземные скважины.

Для цитирования: Бригида В.С., Джиеова А.К. Определение шага возведения искусственных полос частичной закладки для снижения эмиссии климатически активных газов // Уголь. 2024;(4):74-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-74-78.

Abstract

The global challenge facing the domestic mining industry is to ensure “decarbonization” of coal mining to achieve sustainable development of mining production. In this regard, the purpose of the work was to improve the methodology of determining the step of artificial strips of partial filling to reduce the emission of climatically active gases, by increasing the stability of degasification wells under

development. The result of the work was the approbation of the methodology of estimation of dynamic spatial and temporal changes in methane concentration during the formation of the maximum roof span. In addition, the value of the limit state of the roof rocks (150 m), which determines the frequency of construction of artificial structures in the area of the longwall mined-out space, was determined.

Keywords

Sustainable production, roof stability, methane emissions, gas flows, backfilling, underground wells.

For citation

Brigida V.S., Dzhioeva A.K. Determination of construction step to artificial strips of backfilling fore reduce the emission of climatically active gases. *Ugol'*. 2024;(4):74-78. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-74-78.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших мировых вопросов обеспечения устойчивой добычи [1] и рационального освоения георесурсов является необходимость сокращения объемов выбросов парниковых газов. Данный аспект необходимо учитывать при реализации как перспективных геотехнологий [2, 3], так и способов комплексной переработки минерального сырья («декарбонизация») для достижения углеродной нейтральности в добывающих странах [4]. Для углегазовых шахт чаще всего пытаются частично замкнуть энергетический контур потребления за счет собственного производства электроэнергии на основе сжигания отводимой метановоздушной смеси в газопоршневых установках (когенерация) [5]. Данный способ лишь частично позволяет снизить углеродный след добываемого сырья, большинство сопутствующих проблем нуждается в разработке комплекса мер для их решения. Одним из передовых направлений в данном вопросе является формирование «circular waste management», которое реализуется на основе общих принципов «circular economy» [6]. Внедрение данной концепции в горное производство позволит разработать меры, включающие в себя повышение энергоэффективности технологических процессов, снижение объемов хранилищ хвостов обогащения и эмиссии парниковых газов в атмосферу. Данная система мероприятий направлена прежде всего на оптимизацию материальных потоков на основе их цикличности на всех этапах производства [7].

В связи с этим обеспечение устойчивой добычи и комплексного использования техногенных месторождений полиметаллического сырья [8, 9] при сокращении объема выбросов парниковых газов является актуальной научной проблемой.

Вышеизложенная концепция замкнутого цикла геоматериалов обуславливает необходимость захоронения отходов в подземных полостях, что довольно хорошо согласуется с возможностью управления кровлей частичной или полной закладки выработанного пространства. Изменение состава закладочного массива механически активированными хвостами позволит получить мультипликативный эколого-экономический эффект [10]. Особенностью разработки углегазовых месторождений является возможность использования данных о состоянии

аэрогазового режима дегазационной сети для выявления областей предельного равновесного состояния массива. Интересные результаты получены при оценке протяженности зоны разгрузки при моделировании сдвижения в плоскости до начала выемочного участка [11]. В работе [12] довольно показательно изложены проблемы устойчивости подземных скважин, что обуславливает необходимость изменения способа управления горным давлением. Авторами исследования [13] установлено, что влияние лавы на дегазацию массива может распространяться более чем на 140 м в кровлю, до 170 м в выработанном пространстве и 300 м – впереди нее. Экспериментально-аналитические исследования позволяют установить изменчивость метановыделения от положения забоя [13] или расстояния до начала участка. В то же время фактор времени в данной работе учитывается не полностью.

Гипотеза исследования подразумевает определение шага возведения быстровозводимых конструкций из активированных хвостов на основе закономерностей динамики метановыделения (по лаве-аналогу). В связи с этим цель работы – совершенствование методологии определения шага возведения искусственных полос частичной закладки для снижения эмиссии климатически активных газов за счет повышения устойчивости подрабатываемых дегазационных скважин.

Для достижения поставленной цели исследований рассматривались экспериментальные данные концентрации метана в газозвушной смеси, извлекаемой шестью скважинами (подробности шахтных условий приведены в работах [14, 15]). Скважины были пробурены в подработанный ранее углепородный массив (17-й вост. лавы пл. m_2) на глубине свыше 1300 м, в начале отработки выемочного столба 18-й вост. лавы пл. m_3 . Длина скважин – 120 м, частота бурения – 20-40 м между устьями, угол разворота на забой отработанной ранее 17-й вост. лавы – 60°, угол подъема к горизонту – 60°. Скважины бурились для дегазации метана из выработанного пространства отработанной ранее 17-й лавы для минимизации негативных проявлений горного давления (рис. 1). Для определения концентрации метана использовали Dräger X-AM 2500 (сенсор CatEx 125 PR Mining), в некоторых случаях ее проверяли ШИ-12.

Монтажный ходок находился на расстоянии 1376 м от начала участка. На момент наблюдения отход лавы от монтажной выработки достигал 46 м (пикет 1330 м, рядом с отметкой которого была пробурена первая скважина), при этом номер дня от начала года = 100 (9 апреля). Вторая скважина находилась рядом с ПК 131 (1310 м от начала участка), третья – ПК 123, четвертая – ПК 121, пятая – ПК 117, шестая – ПК 113. С отработкой 17-й вост. лавы первичная посадка кровли (по конвейерному штреку) произошла через 252 м, шаг установившейся посадки колебался от 50 до 60 м. В связи с этим выбранный диапазон наблюдений за динамикой аэрогазового режима дегазации массива от 1330 м (пролет – 46 м) до 1130 м (пролет – 246 м) является довольно представительным. Обработка данных временных рядов все еще остается сложной задачей для различных областей знаний [16]. Данные обрабатывались в несколько этапов, включающих в себя: проверку на грубые ошибки, сглаживание шумов

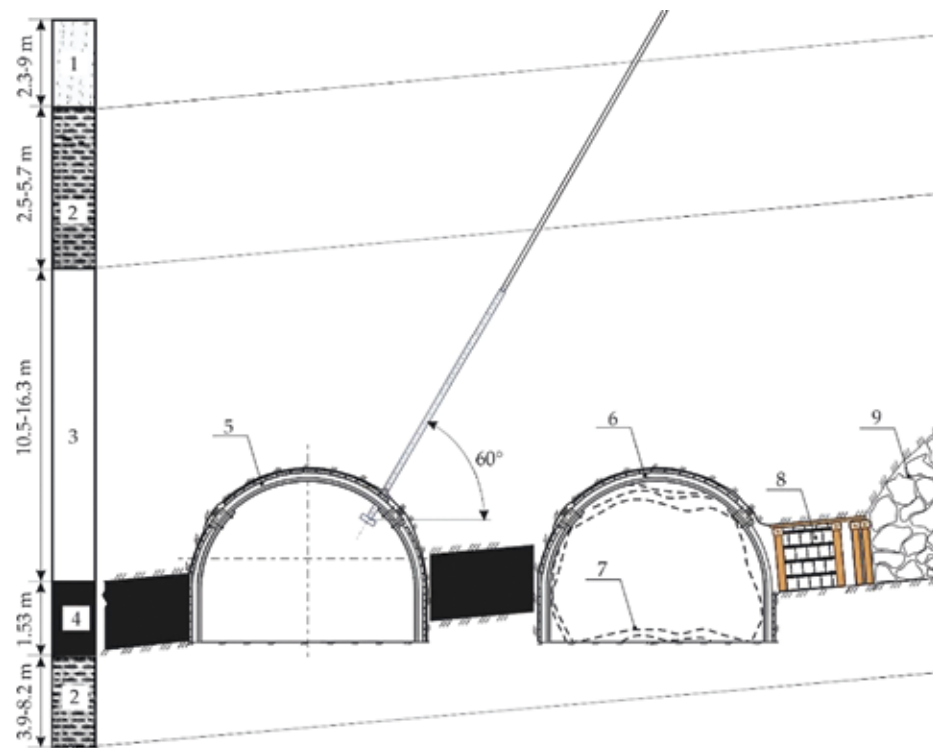


Рис. 1. Условия расположения скважин, пробуренных на выработанное пространство отработанного ранее выемочного столба: 1 – песчаник серый; 2 – алевролит темно-серый; 3 – аргиллит глинистый; 4 – угольный пласт m_3 ; 5 – вентиляционный штрек 18-й вост. лавы; 6 – конвейерный штрек отработанной ранее 17-й вост. лавы; 7 – форма контура конвейерного штрека на момент наблюдения; 8 – литая полоса из «би-крепи»; 9 – выработанное пространство

Fig. 1. Conditions for the location of boreholes drilled into the mined-out space of the previously worked-out extraction pillar: 1 – grey sandstone; 2 – dark-grey siltstone; 3 – clayey argillite; 4 – coal seam m_3 ; 5 – ventilation drift of the 18th East Face; 6 – conveyor drift of the previously worked-out 17th East Face; 7 – the conveyor drift contour line at the moment of observation; 8 – cast strip from the “bi-support”; 9 – mined-out space

методом LOESS, пробелы во временных рядах дополнялись алгоритмом трехмерной интерполяции Р. Ренка, на последнем этапе выстраивалась итоговая поверхность в ПО «gnuplot», по аналогии с работами [17, 18].

ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ШАХТНОГО МЕТАНА ПЕРЕД ГЕНЕРАЛЬНОЙ ПОСАДКОЙ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ

Полученные результаты пространственно-временной изменчивости концентрации метана в плоскости «длина выработки-время замера» представлены на рис. 2 (пример массива данных приведен в таблице).

Определение функции отклика в условиях существенных перегибов поверхности и наличия более пяти экстремумов является довольно сложной задачей, которая не стояла в данном исследовании. В связи с этим параметры формирования частичной закладки определяли графическим способом. Из анализа рис. 2. следует, что начиная с $S = 1270$ м от начала участка (90-100 день), на существенном удалении впереди лавы (слева от серой линии «L», область перехода от синего к фиолетовому цвету) формируется очаг повышенной концентрации метана. Далее «крайне левая» граница этой зоны непрерывно прослеживается до $S = 1167$ м, а затем резко прерывается. Причем ее степень наклона совпадает с углом наклона линии движения лавы (которая обрабатывалась

обратным ходом). Крайняя правая граница рассматриваемого очага также параллельно линии подвигания лавы распространяется до $S = 1210$ м (пролет = 166 м). После этого правая граница резко смещается ближе по отношению к лаве, что существенно расширяет гра-

Экспериментальные данные концентрации метана в дегазационных скважинах

Experimental data of methane concentration in the degassing holes

Время замера, (номер дня с начала года), t	Параметры извлечения метана из скважин		
	Расстояние от устья до забоя лавы, м, L	Устье скважины на пикете, м, S	Замеры метана, %
81	-30	1330	60
85	-28	1330	40
88	-26	1330	27
92	-24	1330	30
93	-22	1330	13
...
121	16	1330	15
126	28	1330	15
131	46	1330	15
132	50	1330	14

ницы зоны максимума метановыделения. На следующем этапе граница начинает «удаляться» от линии лавы под острым углом (30-40°), а затем резко обрывается на рубеже $S = 1167$ м. Данный феномен можно объяснить наличием перетекания газовых потоков в зоне опережающей трещиноватости с образованием аэродинамической связи с выработанным пространством отработанной ранее лавы. Приближение рассматриваемой зоны (правая граница) к линии подвигания лавы косвенно может указывать на формирование предельного напряженно-деформированного состояния в кровле отработываемого пласта.

В связи с этим до первичной посадки, для данных условий, шаг возведения закладочных полос до генерального шага посадки основной кровли не должен превышать 160 м и 90 м в период установившегося шага посадки. Результаты работы более полно раскрывают детали нелинейностей в характере отклика динамики метановыделения на развитие геомеханических процессов при отходе линии очистного забоя от монтажного ходка. Кроме того, полученные модели косвенно подтверждают результаты исследования [19], а также модели деформационных процессов на эквивалентных материалах [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании выполнено моделирование распределения газовых потоков на различном удалении от линии очистного забоя в различные промежутки временных интервалов. Доказано, что впереди лавы (смотри всю область проекции, расположенную левее серой линии "L" на рис.

2) при росте пролета основной кровли (с ростом t) область максимальной концентрации метана (синяя кривая) направлена параллельно линии забоя лавы (на одинаковом удалении от нее). Причем ширина данной области растет начиная с 90-го дня ($S = 1250$ м). С точки 110-го дня ($S = 1250$ м) прослеживается резкий перелом направления краевой линии с существенным расширением зоны локального максимума. Данная нетипичная ситуация прослеживается на протяжении 18-22 м, что косвенно подтверждает факт посадки кровли, сопровождающийся резким увеличением метановыделения из зоны выработанного пространства отработанной ранее лавы. В результате апробирована методика оценки пространственно-временной изменчивости динамики концентрации метана при формировании предельных пролетов кровли. Кроме того, определены пролеты предельного состояния вышележащего массива, обуславливающие частоту возведения искусственных сооружений в выработанном пространстве отработываемой лавы. Установлено, что для данных условий шаг частичной за-

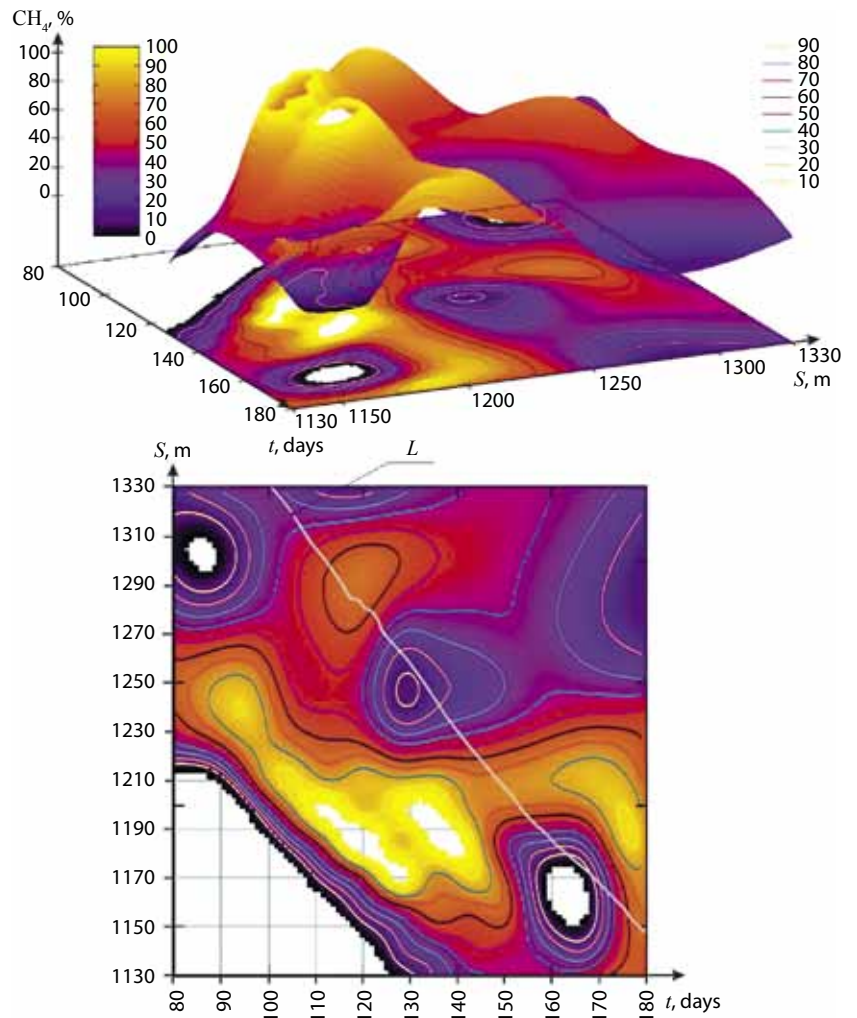


Рис. 2. Пространственное изменение концентрации метана в подработываемом массиве горных пород под влиянием подвигания линии очистного забоя 18-й вост. лавы (L)

Fig. 2. Spatial change of methane concentration in the mined-out rock mass influenced by the advance of the 18th East Face line (L)

кладки до генеральной посадки кровли не должен превышать 150 м. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности разработки практических рекомендаций по прогнозированию шага посадки кровли по лаве-аналогу.

Список литературы • References

1. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of Camellia sinensis (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023;(15):11671. DOI: 10.3390/su151511671.
2. Que C.T., Nevskaya M., Marinina O. Coal Mines in Vietnam: Geological Conditions and Their Influence on Production Sustainability Indicators. *Sustainability*. 2021;(131):1800. DOI: 10.3390/su13211800.
3. Роль человеческого фактора в происхождении и предотвращении аварий и травм на горнодобывающих предприятиях / В.Б. Артемьев, Г.П. Ермак, В.А. Галкин и др. // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 11. С. 79-84. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-11-79-84.

- Artemiev V.B., Ermak G.P., Galkin V.A., Makarov A.M., Kravchuk I.L. The Role of the Human Factor in the Origin and Prevention of Accidents and Injuries at the Mining Enterprises. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022;(11):79-84. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2022-11-79-84.
4. Putilova E., Tsiplakova Y., Diachkova A., Knysh E. Environmental education and its principles. *E3S Web of Conferences*. 2023;(431):09003. DOI: 10.1051/e3sconf/202343109003.
 5. Klyuev R., Tekiev M., Silaev V., Bosikov I., Gavrina O. Sustainable operation analysis of the mining industry power supply system. *E3S Web of Conferences*. 2021;(326):00016. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600016.
 6. Zhanbayev R.A., Yerkin A.Y., Shutaleva A.V., Irfan M., Gabelashvili K., Temirbaeva G.R., Chazova I.Y., Abdykadyrkyzy R. State asset management paradigm in the quasi-public sector and environmental sustainability: In-sights from the Republic of Kazakhstan. *Frontiers in Environmental Science*. 2023;(10):1037023. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1037023.
 7. Kaung P.A., Semikin A.A., Khayrutdinov A.M., Dekhtyarenko A.A. Recycling of industrial waste is a paradigm of resource provision for sustainable development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2): 385-397. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397.
 8. Минимизация опасности металлизированных шахтных стоков / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, А.А. Белодедов и др. // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 7. С. 60-65. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-60-65.
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Belodedov A.A., Versilov S.O. Minimization of the Danger of Metallized Mine Drains. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2023;(7):60-65. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2023-7-60-65.
 9. Feng X., Guo H., Feng X., Yin Y., Li Z., Huang Z., Urynowicz M. Denitrification induced calcium carbonate precipitation by indigenous microorganisms in coal seam and its application potential in CO₂ geological storage. *Fuel*. 2024;(365):131276. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131276.
 10. Panaedova G., Borodin A., Zehir C., Laptev S., Kulikov A. Overview of the Russian Coal Market in the Context of Geopolitical and Economic Turbulence: The European Embargo and New Markets. *Energies*. 2023;(16): 6797. DOI: 10.3390/en16196797.
 11. Захаров В.Н., Трофимов В.А., Шляпин А.В. Моделирование сдвига углевмещающей толщи и оценка уровня разгрузки слагающих ее пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 12. С. 109-127. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-12-0-109.
Zakharov V.N., Trofimov V.A., Shlyapin A.V. Modeling displacements and stress relief in coal-bearing rock mass. *Gornyy informatsionno-analyticheskij bulletin*. 2022;(12):109-127. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-12-0-109.
 12. Rout G., Tailakov O., Zastrelov D., Kolesnichenko S. To the issue of monitoring the length of degasification boreholes. *E3S Web of Conferences*. 2021;(315):01020. DOI: 10.1051/e3sconf/202131501020.
 13. Hou X., Liu S., Zhu Y., Yang Y. Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geo-logical controls: In situ direct method versus indirect method. *Fuel*. 2020;(265):116917. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116917.
 14. Brigida V.S., Golik V.I., Voitovich E.V., Kukartsev V.V., Gozbenko V.E., Konyukhov V.Y., Oparina T.A. Technogenic reservoirs resources of mine methane when implementing the circular waste management concept. *Resources*. 2024;13(2):33. DOI: 10.3390/resources13020033.
 15. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Brigida V.S. Impact of duration of mechanochemical activation on enhancement of zinc leaching from polymetallic ore tailings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020;(5): 47-54. DOI: 10.33271/NVNGU/2020-5/047.
 16. Бюджетная политика горнодобывающего предприятия в условиях меняющейся геополитической обстановки / К.П. Аунг, Е.И. Горелкина, Э.К. Абдулаев и др. // Горная промышленность. 2023. Т. 3. С. 143-153. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-143-153
Aung K.P., Gorelkina E.I., Abdulaev E.K., Mishenina N.A. Expenditure policy of a mining company in changing geopolitical settings. *Gornaya promyshlennost'*. 2023;(3):143-153. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-143-153.
 17. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Y.I. Efficiency Gains When Using Activated Mill Tailings in Underground Mining. *Metallurgist*. 2023;(67):398-408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
 18. Бригида В.С., Мишулина С.И., Стась Г.В. Перспективные направления экологизации структурных элементов туристского продукта краснодарского края (на примере транспортной составляющей) // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т.12(1). С. 24-25. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25.
Brigida V.S., Mishulina S.I., Stas G.V. Perspective directions of "ecologisation" of structural elements of a tourist product of Krasnodar region (case study of transportation component). *Ustojchivoe razvitie gornyx territorij*. 2020;12(1):24-25. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-18-25.
 19. Грязев М.В., Качурин Н.М., Воробьев С.А. Математические модели аэрогазодинамических и теплофизических процессов при подземной добыче угля на различных стадиях отработки месторождений // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 99-108. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99.
Gryazev M.V., Kachurin N.M., Vorobyov S.A. Mathematical models of aerogasdynamic and thermophysical processes in underground coal mining at various stages of mining. *Zapiski gornogo instituta*. 2017;(223):99-108. (In Russ.). DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99.
 20. Han P., Zhang C., Ren Z., He X., Jia S. The influence of advance speed on overburden movement characteristics in longwall coal mining: insight from theoretical analysis and physical simulation. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2021;18(1):163-176. DOI: 10.1093/jge/gxab005.

Authors Information

Brigida V.S. – PhD (Engineering), Senior Research, Associate, Management of Mining Engineering Systems Laboratory, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 111020, Russian Federation, e-mail: 1z011@inbox.ru

Dzhioeva A.K. – PhD (Engineering), Associate Professor Mining Engineering Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 28.11.2023

Поступила после рецензирования: 28.02.2024

Принята к публикации: 26.03.2024

Paper info

Received November 28, 2023

Reviewed February 28, 2024

Accepted March 26, 2024