

Оригинальная статья

УДК 622.273.217.4: [658.567.1:669.1]

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКЛАДОЧНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА

© 2024 г. В. И. Мурко, И. В. Спиридонова, И. Д. Селиванов

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

Аннотация. Актуальность работы обусловлена, с одной стороны, необходимостью решения проблемы проседания земной поверхности в районах подземных горных работ, а с другой – размещением значительного количества золошлаковых отходов угольных ТЭЦ и котельных, отходов горнодобывающей и металлургической промышленности. В настоящей работе приведено описание работы закладочного комплекса на Таштагольском руднике АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Представлен типовой состав закладочной смеси, наиболее дорогостоящими компонентами которой являются цемент Топкинского цементного завода и доменный гранулированный шлак, доставляемый с металлургического комбината в г. Новокузнецк. Проведенными исследованиями установлена возможность оптимизации состава закладочной смеси путем замены цемента и гранулированного шлака на золу уноса «Западно-Сибирской ТЭЦ». Подготовку смеси проводили в лабораторной стержневой мельнице с подбором режима измельчения исходных материалов. В экспериментах добивались необходимых значений крупности (не более 5 % остатка на сите № 0,14) и подвижности закладочной смеси путем добавления воды. Подвижность смеси определяли на приборе Суттарда, встряхивающем столике и стандартном конусе. Представлена методика расчета промышленной стержневой мельницы для замены шаровых мельниц, установленных на руднике. Из подготовленной в лабораторных условиях закладочной смеси готовили образцы твердеющей закладки. Результаты исследований образцов твердеющей закладки показали необходимую прочность при времени выдержки в условиях, моделирующих горную выработку, более 90 суток (более 4 МПа), при этом плотность закладочной смеси составила более 2 г/см³ при замене 50 % на золу уноса.

Ключевые слова: закладочная смесь, Таштагольский рудник, золошлаковые отходы, цемент, доменный гранулированный шлак, стержневая мельница

Для цитирования: Мурко В.И., Спиридонова И.В., Селиванов И.Д. Оптимизация закладочной смеси для Таштагольского рудника. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):103–110. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-103-110](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110)

Original article

OPTIMIZATION OF THE FILLING MIXTURE FOR THE TASHTAGOL MINE

© 2024 V. I. Murko, I. V. Spiridonova, I. D. Selivanov

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

Abstract. The relevance of the work is due, on the one hand, to the need to solve the problem of subsidence of the earth's surface in areas of underground mining, and, on the other, to the placement of a significant amount of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and boiler houses, waste from the mining and metallurgical industries. This paper describes the operation of the laying complex at the Tashtagolsky mine of JSC EVRAZ ZSMK JSC. The typical composition of the filling mixture is presented, the most expensive components of which are cement from the Topkinsky cement plant and blast furnace granulated slag delivered from the metallurgical plant in Novokuznetsk. The conducted research has established the possibility of optimizing the composition of the filling mixture by replacing cement and granular slag with fly ash from the West Siberian thermal power plant. The preparation of the mixture was carried out in a laboratory rod mill with the selection of

the grinding mode of the starting materials. In experiments, the required values of fineness (no more than 5 % of the residue on the sieve No. 0.14) and mobility of the filling mixture were achieved by adding water. The mobility of the mixture was determined on a Souttard device, a shaking table and a standard cone. A method for calculating an industrial rod mill to replace ball mills installed at the mine is presented. Samples of the hardening bookmark were prepared from the prepared in laboratory conditions. The results of studies of the hardening bookmark samples showed the necessary strength at a holding time in conditions simulating mining for more than 90 days (more than 4 MPa), while the density of the laying mixture was more than 2 g/cm³ when replacing 50 % with fly ash.

Keywords: filling mixture, Tashtagol mine, ash and slag waste, cement, blast furnace granulated slag, rod mill

For citation: Murko V.I., Spiridonova I.V., Selivanov I.D. Optimization of the filling mixture for the Tashtagol mine. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47): 103–110. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-103-110](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110)

Введение

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе угольных и рудных, во многих регионах России возникают проблемы экологического характера, связанные с проседанием земной поверхности в районах подземных работ [1], а также со складированием и хранением значительного объема золошлаковых отходов (ЗШО) угольных ТЭЦ и отходов горнодобывающей и металлургической промышленности [2]. Особую остроту данная проблема приобретает в Кемеровской области – Кузбассе, Хакасии и в других регионах с горнодобывающей промышленностью, а также в некоторых странах ближнего [3] и дальнего зарубежья [4].

Закладка заключается в заполнении выработок отходами производства: пустыми породами [5], хвостами обогатительных фабрик [6], металлургическими шлаками [7] или другими материалами [8]. Это требует затрат, но дает возможность более полной выемки полезного ископаемого (без оставления целиков и обрушения вмещающих пород). Таким образом, обеспечиваются: минимальные потери и разубоживание руды, сохранение ненарушенными налегающих массивов и земной поверхности (при полной и плотной закладке), возможность отработки возгорающихся руд, размещение под землей части отходов производства [10].

Твердеющая литая закладка – наиболее распространенный вид закладки, обеспечивающий высокое ее качество [11]. На поверхностном комплексе приготавливают закладочную смесь, близкую по своим свойствам к литому песчаному или обычному (с крупным заполнителем) бетону [12]. Подготовленная смесь характеризуется повышенным расходом вяжущих веществ и воды с целью обеспечения высокой ее пластичности и подвижности [13]. Подвижность смеси должна обеспечивать ее транспортабельность и

размещение в выработанном пространстве под небольшим углом (1 – 5 и до 10°) [14].

Одной из проблем по оптимизации составов закладочной смеси является замена цемента на техногенные отходы, например на золу уноса и тонкомолотый стеклобой [15], наполнитель для удешевления цемента [16]. Процессы гидратации золы в пуццолановых цементах изучали и зарубежные ученые [17], в качестве заполнителей предлагают применять золошлаковые смеси после отходов обогащения угля [18], смесь золы уноса и шлака [19]. Авторами работы [20] рассмотрен механизм гидратации цемента на основе шлаков в составе закладки.

На Таштагольском руднике работает закладочный комплекс, состоящий из склада исходных материалов (хвосты дробильно-обогатительной фабрики (ДОФ), доменный гранулированный шлак, цемент) и измельчительно-отделения с бункерным хозяйством. Со склада хвосты ДОФ и доменный гранулированный шлак автотранспортом доставляются до бункерного хозяйства и загружаются в соответствующие аккумулирующие бункера, из которых ленточными конвейерами подаются в расходные бункера. Из расходных бункеров данные материалы дозированно поступают на сборный ленточный конвейер. На данный конвейер также дозируется цемент из отдельного расходного бункера, куда он поступает с помощью винтового конвейера со склада. Смесь исходных материалов со сборного ленточного конвейера загружается в течку шаровой мельницы, куда также дозированно подается вода. После мокрого измельчения полученная закладочная смесь выгружается в зумпф, из которого самотеком направляется в специальный желоб, по которому доставляется до предварительно подготовленной заполняемой выработки. На руднике работают две технологические линии мокрого измельчения.

Химический состав золы уноса
Table 1. Chemical composition of fly ash

Элемент	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	C	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	P	K ₂ O
Содержание, %	56,29	8,93	5,38	8,50	14,71	1,50	0,15	0,15	0,11	0,97
Элемент	K ₂ O	Na ₂ O	BaO	SrO	ZnO	TiO ₂	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	–
Содержание, %	0,97	1,16	0,19	0,10	0,014	0,91	0,051	0,15	0,016	–

Типовой состав применяемой на Таштагольском руднике закладочной смеси: ПЦ М400 (г. Топки) 40 кг, доменный гранулированный шлак 400 кг, хвосты дробильно-обогащительной фабрики (ДОФ) – заполнитель (г. Таштагол) 1200 кг, вода 500 л (на 1 м³). Наиболее дорогостоящими компонентами закладки являются цемент и доменный гранулированный шлак.

Цель настоящей работы состояла в определении оптимального состава закладочной смеси для применения на Таштагольском руднике за счет снижения количества цемента и доменного гранулированного шлака с сохранением требуемых характеристик.

В процессе исследований решались следующие задачи:

- определение необходимого времени помола материалов в стержневой мельнице при типовом составе закладочной смеси для достижения требуемой крупности твердых частиц в готовой смеси;
- определение оптимального состава закладочной смеси с уменьшением количества цемента и гранулированного шлака;
- определение подвижности полученных проб закладочной смеси;
- оформление методики расчета производительности промышленной стержневой мельницы;
- изготовление образцов твердеющего закладочного материала;
- исследование полученных образцов закладочного материала на прочность.

Методы и принципы исследования

Для оптимизации состава закладочной смеси путем замещения части цемента и доменного гранулированного шлака была использована зола уноса «Западно-Сибирской ТЭЦ» АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК). В табл. 1 (здесь и далее % (по массе)) представлен химический состав (рентгеноспектральный анализ) золы уноса. Преобладание кремнезема и глинозема свидетельствует о том, что зола является кислой, так как модуль основности (Мо), определяемый как $(CaO + MgO) / (Al_2O_3 + SiO_2)$, равен 0,1.

Анализ химического состава золы уноса «Западно-Сибирской ТЭЦ» показывает, что данный продукт соответствует требованиям ГОСТ 25818 – 2017 (табл. 2) и может быть использован для приготовления бетонных смесей.

Минералогический состав золы уноса определялся рентгеноструктурным способом, который показал, что в золе преобладает рентгено-аморфное вещество. Также присутствуют в небольшом количестве: α -SiO₂ – α -кварц, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ – муллит, Fe₃O₄ – магнетит, вероятно C – графит (следы механического недожога), примеси.

Все компоненты закладочной смеси являются сыпучими материалами, насыпные плотности золы уноса, доменного граншлака и хвостов ДОФ составляют 900 – 950, 1200 – 1240 и 1700 – 1750 кг/м³ соответственно. Зола уноса является тонкодисперсным материалом и характеризуется

Т а б л и ц а 2

Результаты сравнения показателей качества летучей золы уноса «Западно-Сибирская ТЭЦ»
Table 2. The results of comparing the quality indicators of fly ash entrainment “West Siberian thermal power plant”

Содержание	Ед. измерения	Значения по ГОСТ	Результаты по протоколу	Результат сравнения
CaO	%, не более	10	5,38	Соответствует
MgO	%, не более	5	1,50	Соответствует
SO ₃	%, не более	3	0,15	Соответствует
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (56,29 + 14,71 + 8,9)	%, не менее	70	79,90	Соответствует

Техническая характеристика лабораторной стержневой мельницы
Table 3. Technical characteristics of the laboratory rod mill

Показатель	Единица измерения	Значение
Диаметр барабана	мм	300
Длина барабана	мм	450
Частота вращения барабана	об./мин	47
Мощность двигателя	кВт	1
Масса стержневой загрузки	кг	55
Коэффициент относительной скорости вращения	%	61



Рис. 1. Отбор пробы закладочной смеси из стержневой мельницы

Fig. 1. Sampling of the filling mixture from the core mill

остатком на сите № 02 – $10 \div 15$ %. Доменный граншлак в виде песка с крупностью до 3,0 (3,2) мм. Хвосты ДОФ представлены классами крупности 5 – 10 и 10 – 20 мм.

Для расчета производительности промышленной стержневой мельницы по данным лабораторных испытаний использована известная методика В.А. Олевского [10]. Для указанного расчета необходимо определить удельную производительность мельницы по исходному загружаемому материалу (q) и по вновь образованному расчетному классу (q_i):

$$q = \frac{60P}{T_0 V}; \quad (1)$$

$$q_i = q \frac{\beta_i - \alpha_i}{100}; \quad (2)$$

где P – масса твердого в загрузке, кг (принято $P = 3$ кг); T_0 – время измельчения (время отбора

пробы); V – объем мельницы, л; β_i и α_i – содержание i -го класса (по минусу) в готовой суспензии и в исходной загрузке, %.

Для моделирования процесса помола компонентов закладочной смеси использована лабораторная стержневая мельница, техническая характеристика которой представлена в табл. 3.

Выбор мельницы обусловлен необходимостью получения наилучшей текучести закладочной смеси при большем заполнении ее твердой фазой.

Экспериментально установлено оптимальное время измельчения в стержневой мельнице – 10 мин. Из мельницы брали пробу полученной смеси, далее ее высушивали и просеивали через сито № 0,14 (рис. 1). Начальное время помола составляло 5 мин, но в результате не была обеспечена требуемая степень помола (составила 65 %) по классу 0,14 мм. В мельнице для набора 55 кг мелющей загрузки потребовалось 30 стержней длиной 41 см и диаметром 2,0 – 2,7 см.

Перед опытами определяли подвижность (рис. 2) закладочной смеси тремя способами: на приборе Сутгарда – составила 18 – 20 см, на встряхивающем столике – 38 – 40 см, на стандартном конусе – 10 – 12 см. Эти данные показывают, что смесь является очень подвижной, литой.

Для исследования возможности по частичной (50 %) и полной (100 %) замене доменного граншлака на золу уноса Западно-Сибирской ТЭЦ, а также по частичной (10, 30 и 50 %) замене цемента на золу уноса для оценки прочности твердеющей закладки были изготовлены серии образцов в форме кубов со стороной 10 см, которые твердели в нормальных условиях (влажность 90 – 95 % и температура 18 – 20 °С) в течение 90 суток (рис. 3).

Прочность образцов определяли в соответствии с ГОСТ 21153.2 – 84, результаты представлены в табл. 4.

Необходимая прочность закладки (≥ 4 МПа) достигается даже при замене 50 % цемента золой уноса (табл. 4), при этом плотность закладочной смеси составляет более 2,0 г/см³. Вместе

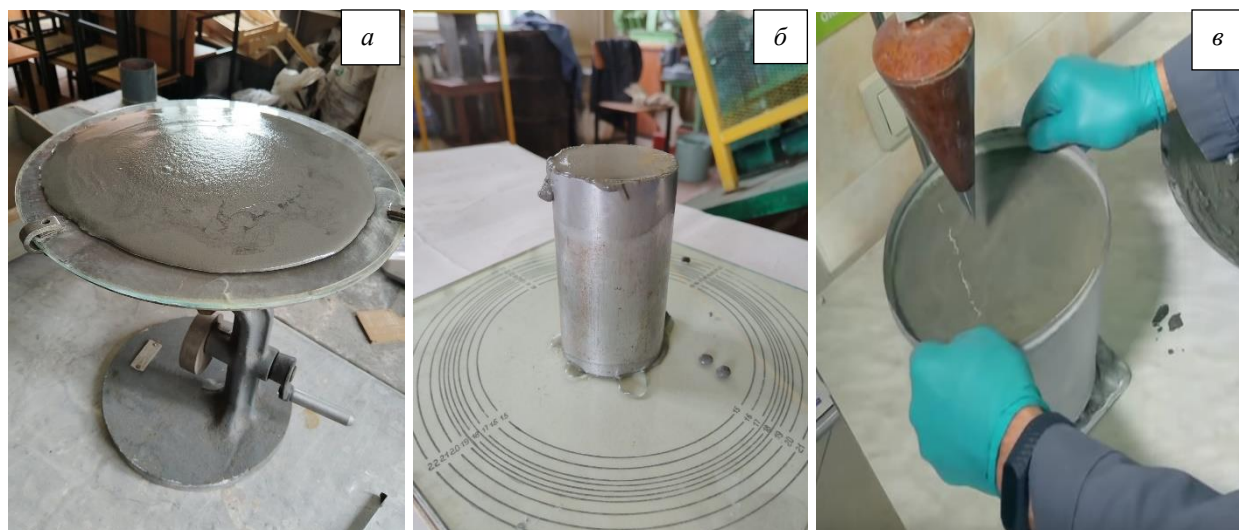


Рис. 2. Определение подвижности закладочной смеси на встряхивающем столике (а), на приборе Суттарда (б) и на стандартном конусе (в)
 Fig. 2. Determination of the mobility of the filling mixture on the shaking table (a), on the Souttard device (b) and on the standard cone (c)

с тем как частичная (50 %), так и полная замена доменного граншлака золой уноса не позволяют получить требуемую прочность закладочного массива. По-видимому, для повышения прочности требуется как увеличить расход заполнителя для повышения плотности закладочной смеси, так и оптимизировать гранулометрический состав закладки.

Выводы

Установлена возможность замены цемента (до 50 %) на золу уноса Западно-Сибирской ТЭЦ при подготовке закладочной смеси на Таштагольском руднике.

Установлена возможность применения стержневых мельниц на операции мокрого измельчения исходных материалов с получением требуемого гранулометрического состава и текучести готовой закладочной смеси.

Необходимо провести дополнительные исследования по оптимизации гранулометрического состава закладочной смеси с целью замены доменного гранулированного шлака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Должиков П.Н., Пронский Д.В., Пронская Н.В. Исследования тампонажно-закладочных ресурсосберегающих смесей для ликвидации выработанного пространства. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2023;4:590–598.
2. Кулагина Т.А., Хаглеев П.Е., Кулагин В.А. *Техносферная безопасность в теплоэнергетике. Топливоподготовка и золошлакоотвалы*. Москва: Русайнс, 2021;408.

3. Газиев У.А., Рахимов Ш.Т. Закладочные смеси с применением отходов горно-металлургического комбината Узбекистана. *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2020;16(3):109–115.
4. Cao H., Gao Q., Zhang X., Guo B. Research progress and development direction of filling cementing materials for filling mining in iron mines of China. *Gels*. 2022;8:192. <https://doi.org/10.3390/gels8030192>
5. Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(11):30–36.
6. Волков Е.П., Анушенков А.Н. *Разработка технологии закладки горных выработок*



Рис. 3. Твердение образцов
 Fig. 3. Hardening of samples

Результаты испытаний образцов закладочной смеси
Table 4. Test results of samples of the filling mixture

Доля замены на золу уноса, %	Расход материалов, кг (на замес)					Основные характеристики	
	Цемент	Доменный граншлак	Зола уноса	Заполнитель	Вода	Средняя плотность, г/см ³	Прочность при сжатии (в возрасте 90 суток)
Замена цемента							
10	0,162	1,87	0,018	5,62	2,33	2,108	4,25
30	0,126	1,87	0,054	5,62	2,33	2,065	4,18
50	0,090	1,87	0,090	5,62	2,33	2,051	4,09
Замена доменного граншлака							
50	0,180	0,93	0,930	5,62	2,33	1,930	3,26
100	0,180	0	1,870	5,62	2,33	1,840	2,45

литыми твердеющими смесями на основе хвостов обогащения. Красноярск: изд. Сиб. федер. ун-та, 2020;176.

7. Волков М.А., Гринюк А.П., Мурко В.И., Хямяляйнен В.А., Баёв Д.А. Подготовка тампонажных растворов на основе золошлаковых отходов при сжигании водугольного топлива из угольных шламов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;8:97–104.
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-97-104>
8. Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Копылов А.Б., Головин К.А. Техногенные отходы в закладочных смесях – путь снижения воздействия на экологию. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;1:152–164.
9. Dong Y. *Study on the coordinated and comprehensive utilization of multiple solid waste resources in jinchuan mine filling mining*. Beijing University of Science and Technology. Beijing, China, 2019.
10. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Вернигор В.В. Эффективность утилизации доступного сырья для изготовления твердеющих закладочных смесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;11:1:85–93.
11. Тюляева Ю.С., Ковалик Т., Рыбак А. Строительно-закладочные смеси на основе техногенных отходов. *Технологии бетонов*. 2021;2(175):45–51.
12. Стась Г.В., Урумова Ф.М., Небылова Я.Г., Чельдиева З.К. Концепция выбора составов бетонных смесей для подземного строительства при добыче руд. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2020;9-10(260-261):45–50.
13. Shobeiri V., Bennett B., Xie T., Visintin P. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01832.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832>
14. Перез Л.А., Переа К.Г. Обоснование состава и параметров технологии цементной закладки на руднике Cerro lindo, Перу. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;4:68–78.
<https://doi.org/10.15372/FTPRI20230408>
15. Varshney H. The possibility of replacement of cement by fly ash and glass powder. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2020;07(03):516 – 523.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17991.73126>
16. Liang F., Yang X., Bian Z., Yang H., Gao Q. Experimental study on low cost green filling cementitious material. *Min. Res. Dev.* 2019;39:16–21.
17. Kinomura K., Ishida T. Enhanced hydration model of fly ash in blended cement and application of extensive modeling for continuous hydration to pozzolanic micro-pore structures. *Cem. Concr. Compos.* 2020;114:103733.
18. Murko V., Khyamyalyainen V., Baranova M. Use of ash-and-slag wastes after burning of fine-dispersed coal-washing wastes. *E3S Web of Conferences*. 2018;41:01042.
19. Giergiczny Z. *Fly ash and slag*. Silesian University of Technology. Gliwice, śląskie, Poland. 2019.
20. Ni W., Li Y., Xu C. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials from slag electric furnace reduction slag. *J. Cent. South Univ.* 2019;50:2342–2350.

REFERENCES

1. Dolzhikov P.N., Pronsky D.V., Pronskaya N.V. Studies of plugging and filling resource-saving mixtures for liquidation of the mined-out space. *Proceedings of Tula State University. Earth sciences*. 2023;4:590-598. (In Russ.).
2. Kulagina T.A., Hagleev P.E., Kulagin V.A. *Tech-nosphere safety in thermal power engineering. Fuel treatment and ash and slag dumps*. Moscow: Rusains, 2021;408. (In Russ.).
3. Gaziev U.A., Rakhimov Sh.T. Filling mixtures using waste from the mining and metallurgical combine of Uzbekistan. *Modern industrial and civil engineering*. 2020;16(3):109–115. (In Russ.).
4. Cao H., Gao Q., Zhang X., Guo B. Research progress and development direction of filling cementing materials for filling mining in iron mines of China. *Gels*. 2022;8:192. <https://doi.org/10.3390/gels8030192>
5. Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Cement-free filling mixtures based on water-soluble technogenic waste. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020;331(11)30-36. (In Russ.).
6. Volkov E.P., Anushenkov A.N. *Development of technology for laying mine workings with cast hardening mixtures based on enrichment tailings*. Krasnoyarsk: Publishing House of the Siberian Federal University. Univ., 2020;176. (In Russ.).
7. Volkov M.A., Grinyuk A.P., Murko V.I., Khamalyainen V.A., Baev D.A. Preparation of grouting solutions based on ash and slag waste during the combustion of coal-water fuel from coal sludge. *Mining information and analytical bulletin*. 2020;8:97–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-97-104>
8. Khairutdinov M.M., Kuziev D.A., Kopylov A.B., Golovin K.A. Technological waste in laying mixtures – a way to reduce the impact on the environment. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2022;1:152–164. (In Russ.).
9. Dong Y. Study on the Coordinated and Comprehensive Utilization of Multiple Solid Waste Resources in Jinchuan Mine Filling Mining. Beijing University of Science and Technology. Beijing, China, 2019.
10. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Vernigor V.V. Efficiency of utilization of available raw materials for the manufacture of hardening filling mixtures. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;11-1:85–93. (In Russ.).
11. Tyulyaeva Yu.S., Kovalik T., Rybak A. Construction and laying mixtures based on man-made waste. *Concrete technologies*. 2021;2(175):45–51. (In Russ.).
12. Stas G.V., Urumova F.M., Nebylova Ya.G., Cheldieva Z.K. The concept of choosing concrete mixtures for underground construction during ore mining. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2020;9-10(260-261):45–50. (In Russ.).
13. Shobeiri V., Bennett B., Xie T., Visintin P. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01832. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832>
14. Perez L.A., Perea K.G. Substantiation of the composition and parameters of cement laying technology at the Cerro lindo mine, Peru. *Physical and technical problems of mining*. 2023;4:68–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230408>
15. Varshney H. The possibility of replacement of cement by fly ash and glass powder. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2020;07(03):516 – 523. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17991.73126>
16. Liang F., Yang X., Bian Z., Yang H., Gao Q. Experimental study on low cost green filling cementitious material. *Min. Res. Dev.* 2019;39:16–21.
17. Kinomura K., Ishida T. Enhanced hydration model of fly ash in blended cement and application of extensive modeling for continuous hydration to pozzolanic micro-pore structures. *Cem. Concr. Compos.* 2020;114:103733.
18. Murko V., Khyamyalyainen V., Baranova M. Use of Ash-and-Slag Wastes after Burning of Fine-Dispersed Coal-Washing Wastes. *E3S Web of Conferences*. 2018;41:01042.
19. Giergiczny Z. *Fly ash and slag*. Silesian University of Technology. Gliwice, śląskie, Poland. 2019.
20. Ni W., Li Y., Xu C. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials from slag electric furnace reduction slag. *J. Cent. South Univ.* 2019;50:2342–2350.

Сведения об авторах

Василий Иванович Мурко, д.т.н., профессор, директор Центра инновационных угольных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sib_eco@mail.ru

SPIN-код: 1092-6052

Ирина Владимировна Спиридонова, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sp1ridonova-iv@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-9965-5765
SPIN-код: 8682-9406

Илья Дмитриевич Селиванов, магистрант кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors:

Vasilii I. Murko, Dr. Sci. (Eng.), professor, director of the Center for innovative coal technologies, Siberian State Industrial University

E-mail: sib_eco@mail.ru

SPIN-код: 1092-6052

Irina V. Spiridonova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, head of the Department of engineering structures, construction technologies and materials, Siberian State Industrial University

E-mail: sp1ridonova-iv@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-9965-5765
SPIN-код: 8682-9406

Il'ya D. Selivanov, master's student of the Department of engineering structures, construction technologies and materials, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 28.02.2024

Принята к публикации 06.03.2024

Received 15.11.2023

Revised 28.02.2024

Accepted 06.03.2024