

ПРИМЕНЕНИЕ БУТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ИСКУССТВЕННЫМ ПОДДЕРЖАНИЕМ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

А. Г. Зилеев¹, Д. А. Васильев¹, П. К. Тулин¹, Т. Т. Нгуен¹, В. В. Комолов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Обобщена практика применения бутобетонной смеси при отработке запасов рудных месторождений с искусственным поддержанием выработанного пространства. Основная область применения бутобетона – маломощные, реже средней мощности, крутопадающие рудные тела. Обзор применения бутобетонной смеси показал, что среднее значение прочности искусственного массива варьируется от 2 до 5 Мпа. Размер крупного заполнителя играет важную роль; рекомендуется использовать фракцию в пределах 70–100 мм. Самое распространенное вяжущее вещество – портландцемент; рудничные и грунтовые воды подходят для замешивания смеси при условии, если показатель кислотности pH = 4–12,5, содержание сульфатов не превышает 2,7 г/л, а взвешенных частиц не более 0,3 г/л. В статье даются рекомендации по дальнейшему направлению исследований в области применения бутобетона, в частности: определение прочностных свойств бутобетона при фракции крупного заполнителя 150–200 мм; аналитические исследования по определению конструктивных параметров систем разработки; численное моделирование изменения напряженно-деформированного состояния массива при отработке запасов; разработка рекомендаций по применению бутобетона на основании результатов опытно-промышленных испытаний. В целях снижения себестоимости ведения очистных работ с применением бутобетона порядок отработки запасов блока рекомендуется следующий: вначале формируются бутобетонные целики, затем отрабатываются запасы камеры и камера засыпается сухой закладкой.

Ключевые слова: рудное месторождение, маломощное рудное тело, крутопадающее рудное тело, камерная система разработки, бутобетон, сухая закладка, междукамерный целик, прочность бутобетона.

Благодарности: Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год №FSRW-2020-0014.

Для цитирования: Зилеев А. Г., Васильев Д. А., Тулин П. К., Нгуен Т. Т., Комолов В. В. Применение бутобетонной смеси при разработке рудных месторождений с искусственным поддержанием выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–1. – С. 21–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_21.

Applications of the artificially supported stoping method with cemented rockfill in mining

A. G. Zileev¹, D. A. Vasiliev¹, P. K. Tulin¹, T. T. Nguyen¹, V. V. Komolov¹

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

Abstract: The article gives an applications of the artificially supported stoping method with cemented rockfill. Cemented rockfill is mainly used in mining thin, steeply dipping ore bodies. A study of cemented rockfill application has shown, that the average strength of fill mass ranges from 2 to 5 MPa; the size of coarse aggregate plays an important role and it is recommended to use sizes within the range from 70 to 100 mm; the most common binder is Portland cement; mine and groundwater are suitable for mixing provided that $4 \geq (\text{pH}) \geq 12.5$, sulphate content does not exceed 2.7 g/l, and that of other solids is less than – 0.3 g/l maximum. The article gives recommendations for further research in the field of cemented rockfill, application in particular: the determination of its strength properties at coarse aggregate sizes from 150 to 200 mm; determination of design parameters of the mining system; numerical modelling of stress-strain changes in rock mass during mining, development of recommendations on the use of the cemented rockfill based on the results of pilot tests. In order to reduce the cost of mining with cemented rockfill, the following order of operations is recommended: first, cemented rockfill pillars are formed, then the stope reserves are worked out, and then the stope is filled with rockfill.

Key words: ore deposits, thin ore bodies, steep ore bodies, room-and-pillar method, cemented rockfill, rockfill, rib pillar, unconfined compressive strength of cemented rockfill.

Acknowledgements: The study was funded through a government research grant for 2021 (№FSRW-2020-0014).

For citation: Zileev A. G., Vasiliev D. A., Tulin P. K., Nguyen T. T., Komolov V. V. Applications of the artificially supported stoping method with cemented rockfill in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–1):21–34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_21.

Введение

В настоящее время при отработке запасов рудных месторождений системами с искусственным поддержанием выработанного пространства становится всё более распространённым применение бутобетона в качестве закладочного материала или для формирования искусственных целиков. В зарубежной практике используется термин «сцементированная породная закладка» (cemented rockfill (CRF)).

Применение бутобетона позволяет в подходящих условиях повысить коэффициент извлечения запасов, снизить разубоживание добываемой руды, решить проблему утилизации породы, а также достичь высокого уровня безопасности ведения горных работ.

Простота изготовления бутобетонной смеси в подземных условиях без строительства закладочного комплекса позволяет более широко использовать данный вид закладки.

Использование твердеющей закладки дает возможность применения восходящего порядка отработки запасов месторождения, что при горном рельефе позволяет начать добычу руды в кратчайшие сроки, с минимальным объёмом горно-капитальных и горно-подготовительных работ на первоначальном этапе.

К недостаткам системы разработки с применением бутобетона можно отнести: более высокую себестоимость по сравнению с применением сыпучего закладочного материала, низкую производительность закладочных работ, не всегда выдерживаемое качество закладки, возможную нехватку пустой породы, сезонность поставки цемента (в труднодоступных районах).

Основными преимуществами бутобетона в качестве закладки или при формировании междукамерных целиков считают: снижение негативного влияния мульды сдвижения [1–4];

предотвращение обрушения вмещающих пород в процессе добычи [5, 6]. Кроме того, уменьшение площади под отвалы пустой породы приведет к повышению технико-экономических показателей предприятия и снижению антропогенного воздействия [7, 8].

Исследования в области применения бутобетона включают два основных направления: 1 — изучение свойств бутобетона в зависимости от крупности заполнителя, типа и количества вяжущего материала, минеральных примесей и т.д. [9–13]; 2 — изучение последствий применения бутобетона на горных предприятиях, в частности оценку смещений контура выработки, осадки поверхности, а также изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе очистных работ [14–20]. Многие исследователи обратили внимание на эти направления по изучению свойств бутобетона с использованием экспериментальных [9, 14, 21, 22], аналитических [14] и численных методов [15, 23, 16].

Методы

В процессе обзора рассматривались рудники, где для изготовления бутобе-

тона применяется порода от проходки выработок без дополнительного дробления с формированием смеси в шахтных условиях. Принципиальная схема камерной системы разработки с торцевым выпуском и бутобетонной (породной) закладкой представлена на рис. 1.

Результаты

Выявлена основная область применения бутобетона — это отработка маломощных, реже средней мощности, крутопадающих рудных тел. Закладочный массив (в том числе искусственные целики), в особенности при использовании в качестве закладки пустой породы с добавлением цемента, является средой с трудноопределимыми свойствами и труднопрогнозируемыми параметрами, в том числе. Характеристики бутобетона во многом принимаются на основе опыта применения и промышленных испытаний подобной закладки на сходных по горно-геологическим условиям разработки месторождениях.

Наиболее известными зарубежными рудниками, использующими бутобетонную закладку, являются австралийские рудники: никелевый рудник «Cosmos» и рудник «The Ballarat Gold Project» (далее — «Ballarat») [24, 25].

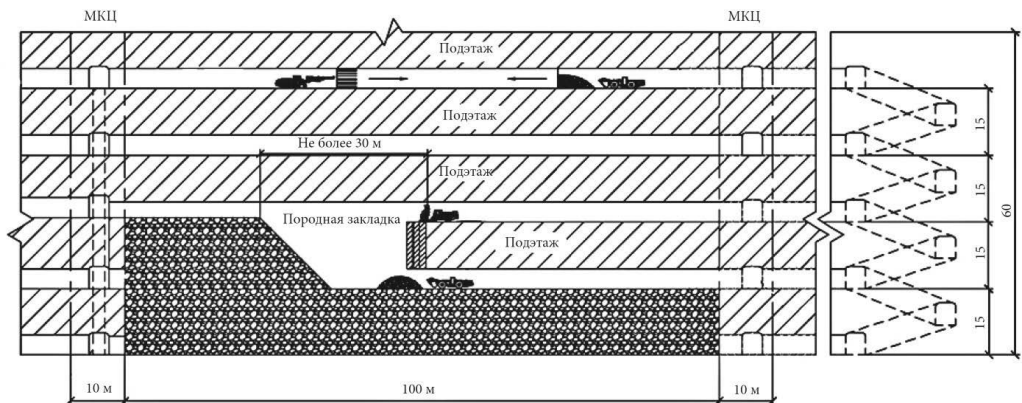


Рис. 1. Принципиальная схема камерной системы разработки с торцевым выпуском и бутобетонной (породной) закладкой

Fig. 1. General view of cut-and-fill stoping method with cemented rockfill

Минимальная прочность закладочного материала на одноосное сжатие, принятая на никелевом руднике «Cosmos», определена на основе численного моделирования, проведенного AMC Consultants (2009), и диаграмм устойчивости, выполненных Stone [26]. Запас прочности, равный двум, был принят вследствие потенциальной возможности неверного приготовления бутобетона в подземных условиях. Минимальная прочность бутобетона на одноосное сжатие при различных механизмах нагружения приведена в табл. 1.

Для условий никелевого рудника Cosmos Western Australian School of Mines (WASM) были проведены лабораторные исследования породы, используемой для бутобетонной закладки, а также испытания образцов самой бутобетонной закладки. На рис. 2 представлен гранулометрический состав породы в процентном соотношении от общего объема образца бутобетона.

Удельный вес и объемная плотность пород рудника «Cosmos» составляют 2,77–3,02 и 2,0–2,16 г/см³ соответственно. Влагосодержание и водопоглощение крупного заполнителя перед смешиванием составляет 0,05% и 0,14% соответственно. Крупный заполнитель главным образом состоит из кислых вулканических пород. Проч-

ность на одноосное сжатие пород рудника изменяется от 135 до 252 МПа в соответствии с испытаниями, проведенными WASM (2010) [22].

Результаты испытаний на прочность образцов бутобетонной закладки, приготовленной в подземных условиях, при одноосном сжатии, представлены в табл. 2.

Закладка выработанного пространства породой с цементом на месторождении Ballarat выполняется для обеспечения возможности бесцеликовой разработки маломощных золотосодержащих жил. Основными типами пород на месторождении Ballarat являются песчаники, алевролиты и кварц, слабо метаморфизованные. Кварц может быть сильнотрещиноватым, особенно в зонах влияния тектонических нарушений. Соотношение вертикальных и горизонтальных напряжений примерно 2:1 [23].

Результаты лабораторных испытаний на прочность при одноосном сжатии образцов бутобетонной закладки, полученных в условиях рудника «Ballarat», представлены в табл. 3. Испытания проводились на образцах диаметром 152 мм и отношением высоты к диаметру 1:1 и 2:1.

Отдельного упоминания требует простой и эффективный, по нашему мнению, способ приготовления смеси на рудниках «Cosmos» и «Ballarat».

Таблица 1

Минимальный предел прочности бутобетона на одноосное сжатие, принятый на руднике «Cosmos» [24]

Summary of minimum required Uniaxial Compressive Strength for the Cosmos mine [20]

Механизм нагружения	Минимальная прочность бутобетона на одноосное сжатие при коэффициенте запаса прочности 2, МПа
Отдельные вертикальные обнажения	0,5
Подработанный горизонт	2,3
Целик, поддерживающий нецементированную породную закладку	2,3

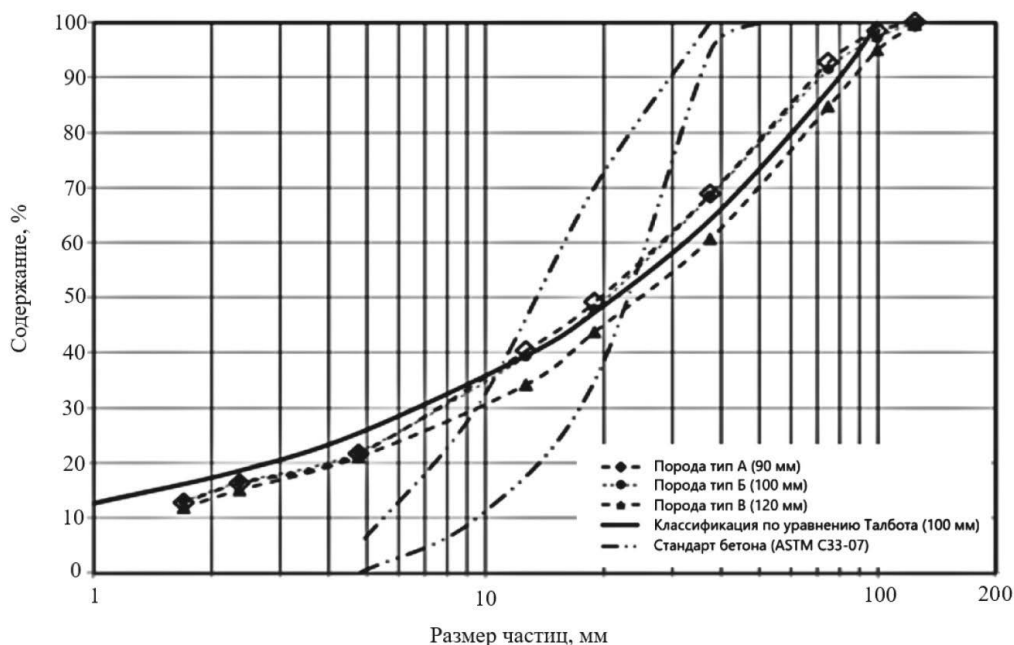


Рис. 2. Кривые распределения гранулометрического состава породы на руднике «Cosmos» [24]
 Fig. 2. Particle size distribution curves of waste rock from Cosmos nickel mine [24]

Таблица 2

Предел прочности образцов бутобетонной закладки на одноосное сжатие, приготовленной в подземных условиях (никелевый рудник «Cosmos») [24]

Summary of Uniaxial Compressive Strength testing from underground mixes (Cosmos nickel mine) [24]

Объемное содержание цемента (%)	Набор прочности, сутки	Удельный вес (кН/м ³)	Максимальное усилие (кН)	Прочность на одноосное сжатие (МПа)	Смещение под максимальной нагрузкой (мм)
3	34	17,21	247,80	1,26	—
3	Более 28	18,79	197,38	1,01	5,0
3	Более 28	19,56	623,20	3,17	5,6
3	Более 28	20,17	402,33	2,05	7,4
3	Более 28	20,42	769,11	3,92	5,5
3	Более 28	20,37	707,82	3,60	5,0
3	Более 28	20,22	449,82	2,29	5,1
3	Более 28	22,31	793,81	4,04	6,3
4	32	19,76	503,20	2,56	—
4	44	18,64	337,60	1,72	—
4	26	19,10	260,15	1,32	—
4	28	21,59	444,67	2,26	8,5
4	34	19,05	340,09	1,73	5,4

Окончание табл. 2

Объемное содержание цемента (%)	Набор прочности, сутки	Удельный вес (кН/м ³)	Максимальное усилие (кН)	Прочность на одноосное сжатие (МПа)	Смещение под максимальной нагрузкой (мм)
4	35	20,32	232,07	1,18	7,1
5	30	18,95	527,00	2,68	–
5	Более 28	22,41	1037,00	5,28	–
5	Более 28	22,31	1038,60	5,29	7,1

Таблица 3

Результаты испытаний на прочность образцов бутобетонной закладки при одноосном сжатии (рудник «Ballarat») [25]

Uniaxial Compressive Strength testing program («Ballarat» mine) [25]

Массовая доля цемента, %	Набор прочности, сутки	Диаметр образца, мм	Соотношение высота/диаметр	Прочность на одноосное сжатие, кПа	Модуль упругости, МПа
3	7	152	1	881	44
3	14	152	1	1442	88
3	14	152	1	1259	60
3	28	152	1	1576	87
5	7	152	1	2026	111
5	14	152	1	4190	274
5	14	152	1	3645	105
5	28	152	1	3613	148
3	14	152	2	857	55
3	14	152	2	988	52

Перемешивание породы и цементного раствора осуществляется в специально устроенных технологических нишах с помощью ковша погрузочно-доставочной машины (ПДМ). Выбор такого способа приготовления бутобетона обусловлен наиболее низкой стоимостью по сравнению с другими способами. Как правило, используется ПДМ с вместимостью ковша 7 м³.

На рис. 3 представлена схема организации технологической ниши для работы ПДМ с вместимостью ковша 7 м³ для приготовления бутобетонной закладки для смесей с процентным содержанием цемента 5%.

В табл. 4 приведены различные рецептуры закладочной смеси на рудниках Северной Америки [27,28].

На одном из золоторудных месторождений РФ, на основании численного моделирования [29], рекомендуемая прочность целиков из бутобетона составляет от 1,5 до 4 МПа [30].

Для условий месторождения «Майское» (РФ), также на основании численного моделирования [31], делается вывод, что прочность закладочного массива должна составлять 1,5–2,0 МПа [31].

В статье [28] дается обоснование технологии отработки маломощной крутопадающей залежи ниже дна карьера

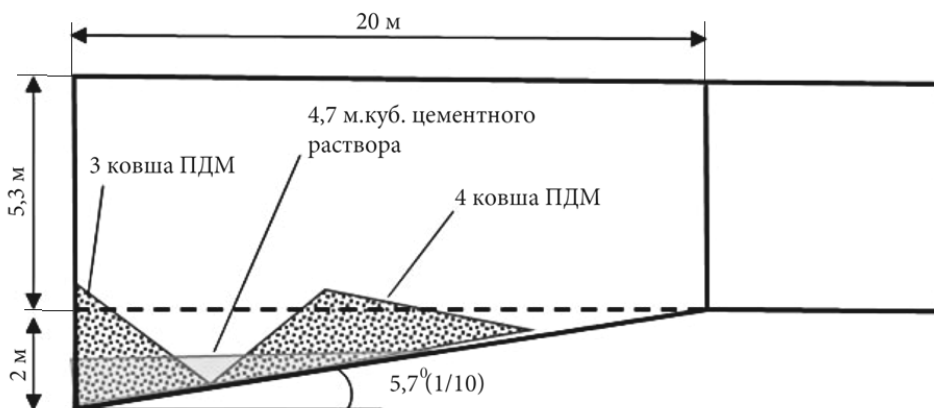


Рис. 3. Схема устройства технологической ниши для смешивания закладочной смеси на руднике «Ballarat» для смесей с процентным содержанием цемента 5% [25]; размеры даны в метрах

Fig. 3. Design of sump mixing system for 5% mixes from «Ballarat» mine [25]

Таблица 4

Рецептуры бутобетона на некоторых североамериканских рудниках
CRF recipes of North-American Mines

Наименование рудника	Максимальный размер крупного заполнителя, мм	Крупный заполнитель/ мел-кий заполнитель, %	Вяжущее вещество, %	Предел прочности искусственного массива на одноосное сжатие, МПа
Deep Post	88,90	70/30	6,75	5,52
Carlin East	76,20	70/30	6,1	4,83
Deep Star	76,20	75/25	6,1	4,83
Rodeo	88,90	87/13	8	4,83
Meikle	50,80	60/40	6	5,52
Bullfrog	76,20	70/30	7,2	4,48
Turquoise Ridge	76,20	70/30	7,5	4,83
Kidd Creek	152,40	67/33	5	6,07
Bousquet	152,40	-	5	5,17
Birchtree	203,20	100/0	4	1,52

применительно к одному из эксплуатируемых золоторудных месторождений. Суть технологии заключается в том, что этаж разделяется на подэтажи высотой 12–20 м. Выемка подэтажей в пределах этажа осуществляется в восходящем порядке. Отработка запасов подэтажа производится в две очереди. Сначала

отрабатываются и закладываются бутобетоном камеры I очереди. При возведении бутобетонных целиков в рудном штреке на этих участках возводится крепь.

После набора закладочным массивом нормативной прочности и создания необходимого опережения фронта

горных работ приступают к отработке камер II очереди. По мере их погашения с рудного штрека вышележащего подэтажа производится закладка выработанного пространства пустой породой. Таким образом, на вышележащем подэтаже формируется комбинированная почва из чередующихся участков бутобетона и пустых пород. При этом породная закладка не является элементом несущей конструкции, основное ее назначение — боковой подпор открытых обнажений, она также служит платформой для рабочих и оборудования, занятых на очистных работах при погашении вышележащих подэтажей. Прочность бутобетонной закладки должна составлять при мощности рудного тела 2,0, 5,0 и 10,0 м, соответственно, не менее 3,0, 4,0 и 5,0 МПа [32].

Можно выделить общие требования к заполнителям:

- 1) предел прочности должен быть не менее чем на 10—15% выше нормативной прочности закладки;
- 2) небольшая размокаемость в воде;
- 3) низкий коэффициент увеличения в объеме во влажной среде;
- 4) отсутствие вредных примесей;
- 5) экономичность.

Как уже было сказано, порода, используемая в качестве заполнителя, не должна содержать вредных примесей. Согласно ГОСТ 8267—93. «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ», к основным компонентам, снижающим прочность и долговечность бетона, относят включения:

- глинистых минералов (монтмориллонита, каолинита и др.);
- слюд и гидрослюды и других слоистых силикатов;
- асбеста;
- органических веществ (угля, лигнита, горючих сланцев, гумусовых кислот и др.);

- минералов, неустойчивых к процессам выветривания (хлорита, цеолита, апатита, нефелина, фосфорита).

К основным компонентам, вызывающим ухудшение качества поверхности и внутреннюю коррозию бетона, относят включения:

- пород и минералов, содержащих аморфные разновидности диоксида кремния (халцедон, опал и др.);
- серосодержащих пород и минералов (пирит, марказит, пирротин и другие сульфиды, а также гипс, ангидрит и другие сульфаты);
- пород и минералов, содержащих оксиды и гидроксиды железа (магнетит, гетит и др.);
- слюд, гидрослюды и других слоистых силикатов.

Согласно ГОСТ 23732—2011. «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия», вода подходит для замешивания смеси при условии, если показатель кислотности $pH = 4—12,5$, содержание сульфатов не превышает 2,7 г/л, а взвешенных частиц не более 0,3 г/л.

На основании данных по использованию цементированной породы [32], срок набора необходимой прочности составляет от 1 до 3 месяцев. Принимая во внимание опыт разработки Албазинского месторождения системой разработки с закладкой породой с цементом, ожидаемые минимальные сроки набора прочности закладочного массива рекомендуется принимать в интервале 1,5—3 месяцев.

Обсуждение результатов

Обзор технологий разработки с применением бутобетонной смеси показал, что среднее значение прочности искусственного массива варьируются от 2 до 5 МПа; размер крупного заполнителя играет важную роль, рекомендуется использовать фракцию

в пределах 70—100 мм; самое распространенное вяжущее вещество — портландцемент; рудничные и грунтовые воды подходят для замешивания смеси при условии, если показатель кислотности $pH = 4-12,5$, содержание сульфатов не превышает 2,7 г/л, а взвешенных частиц не более 0,3 г/л.

Из опыта зарубежных рудников можно сделать вывод, что в процессе внедрения бутобетона применяются экспериментальные, лабораторные и численные методы для определения характеристик бутобетонной закладки. На российских предприятиях зачастую ограничиваются численным моделированием с редким проведением опытно-промышленных испытаний без научного сопровождения.

Отсутствие методологии для определения параметров камерной системы разработки с бутобетонными целиками/закладкой диктует следующий порядок работ для применения бутобетона: аналитические исследования — численное моделирование — лабораторные испытания — опытно-промышленные испытания.

При проходке горных выработок по пустым породам с помощью буровзрывных работ наиболее распространенной является фракция 150–200 мм. Поэтому для дальнейших исследований состава и прочностных свойств бутобетонной смеси предлагаются исследования с гранулометрическим составом крупного заполнителя 150–200 мм.

Заключение

В результате анализа и обобщения преимущественно зарубежного опыта использования бутобетона для управления горным давлением при отработке крутопадающих рудных месторождений установлены первоочередные

направления и этапы экспериментальных и сопровождающих теоретических исследований для некоторых отечественных рудников в целях расширения указанного опыта.

В частности, одна из первоначальных и наиболее простых технологических схем использования бутобетона может заключаться в следующей последовательности работ: формирование бутобетонных междукамерных целиков, отработка запасов камер, заполнение камер сыпучим закладочным материалом.

Представляются целесообразными постановка и решение дальнейших следующих научных задач: определение прочностных свойств бутобетона для фракции крупного заполнителя 150–200 мм; определение параметров конструктивных элементов систем разработки и изучение напряженно-деформированного состояния отработываемого массива горных пород, включающего элементы бутобетонных конструкций; выполнение экспериментальных и опытно-промышленных работ применительно к условиям отечественных рудников, отработывающих маломощные, крутопадающие залежи.

Вклад авторов

Зилев А. Г. — постановка задачи исследования.

Васильев Д. А. — получение данных для анализа, написание текста статьи.

Тулин П. К. — выполнение работы по систематизации материала.

Нгуен Т. Т. — получение данных для анализа.

Комолов В. В. — написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fall M., Célestin J. C., Pokharel M., Touré M. A.* Contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill // *Engineering Geology*. 2010, vol. 114, no. 3, pp. 397–413. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.05.016.
2. *Li L.* Generalized solution for mining backfill design // *International Journal of Geomechanics*. 2014, vol. 14, no 3. pp. 613–624. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943–5622.0000329.
3. *Nasir O., Fall M.* Modeling the heat development in hydrating CPB structures // *Computers and Geotechnics*. 2009, vol. 36, no. 7, pp. 1207–1218. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.05.008.
4. *Zhu W. B., Xu J. M., Xu J. L., Chen D. Y., Shi J. X.* Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 96, pp. 58–65. DOI:10.1016/j.ijrmmms.2017.04.014.
5. *Zhang J. X., Li B. Y., Zhou N., Zhang Q.* Application of solid backfilling to reduce hard-roof caving and longwall coal face burst potential // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016, vol. 88, pp. 197–205. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2016.07.025.
6. *Zhou N., Li M., Zhang J. X., Gao R.* Roadway backfill method to prevent geohazards induced by room and pillar mining: a case study in Changxing coal mine // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016, vol.16, no.12, pp. 2473–2484. DOI:10.5194/nhess-16–2473–2016.
7. *Benzaazoua M., Bussiere B., Demers I., Aubertin M., Fried E., Blier A.* Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: application to mine Doyon, Quebec, Canada // *Minerals Engineering*. 2008, vol. 21, no. 4, pp. 330–340. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.11.012.
8. *Kesimal A., Yılmaz E., Ercikdi B., Alp I., Deveci H.* Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill // *Materials Letters*. 2005, vol. 59, no. 28, pp. 3703–3709. DOI:10.1016/j.matlet.2005.06.042.
9. *Jiang H., Fall M., Li Y., Han J.* An experimental study on compressive behaviour of cemented rockfill // *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 213, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.008.
10. *Wu J., Feng M., Chen Z., Mao X., Han G., Wang Y.* Particle Size Distribution Effects on the Strength Characteristic of Cemented Paste Backfill // *Minerals*. 2018, vol.8, no. 8 (322), pp. 1–21. DOI: 10.3390/min8080322.
11. *Wu J., Feng M., Ni X., Mao X., Chen Z., Han G.* Aggregate gradation effects on dilatancy behavior and acoustic characteristic of cemented rockfill // *Ultrasonics*. 2019, vol. 92, pp. 79–92. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.008.
12. *Smirnova O. M.* Low-Clinker Cements with Low Water Demand // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020, vol. 32, iss. 7, 0602000. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0003241.
13. *Smirnova O. M., Potyomkin D. A.* Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 7, pp. 874–880.
14. *Li M., Zhang J., Liu Z., Zhao X., Huang P.* Mechanical analysis of roof stability under nonlinear compaction of solid backfill body // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, pp. 863–868. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.029.
15. *Mo S., Canbulat I., Zhang C., Oh J., Shen B., Hagan P.* Numerical investigation into the effect of backfilling on coal pillar strength in highwall mining // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, pp. 281–286. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.07.003.
16. *Zhang J., Zhang Q., Huang Y., Liu J., Zhou N., Zan D.* Strata movement controlling effect of waste and fly ash backfillings in fully mechanized coal mining with backfilling

face // Mining Science and Technology. 2011, vol. 21, pp. 721–726. DOI: 10.1016/j.mstc.2011.03.003.

17. Ковальский Е. Р., Громцев К. В., Петров Д. Н. Моделирование процесса деформирования междукамерных целиков в условиях закладки очистных камер // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 87–101. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0 — 87 — 101.

18. Овчаренко О. В., Айбиндер И. И., Пацкевич П. Г. Исследование удароопасности массива горных пород месторождения «Морошка», обрабатываемого системой разработки с закладкой выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 8. — С. 5–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0 — 5–15.

19. Хайрутдинов А. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Kowalik T., Тюляева Ю. С. Управление напряженно-деформационным состоянием массива горных пород путем формирования разнопрочностной закладки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 42–55. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10 — 0-42 — 55.

20. Трушко В. Л., Господариков А. П., Созонов К. В. Расчет напряженно-деформированного состояния рудного и закладочного массивов при разработке Яковлевского железорудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 111–123. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05 — 0-111 — 123.

21. Lingga B. A., Derek Apel D., Sepehri M., Pu Y. Assessment of digital image correlation method in determining large scale cemented rockfill strains // International Journal of Mining Science and Technology. 2018, vol. 29, no. 5, pp. 771–776. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.12.002.

22. Salvoldi B. G., Van Der Spuy B, Wilson S. Optimisation of cemented aggregate backfill at New Luika Gold Mine // Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. Cape Town, South Africa, 2019, pp. 437–450. DOI: 10.36487/ACG_rep/1910_32_Salvoldi.

23. Pagé P., Li L., Pengyu Yang P., Simon R. Numerical investigation of the stability of a base-exposed sill mat made of cemented backfill // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 114, pp. 195–207. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.008.

24. Saw H., Prentice S., Villaescusa E. Characterisation of cemented rock fill materials for the Cosmos nickel mine, Western Australia // International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering. Hong Kong, China, 2011. pp. 1–8. Available at: <https://rockmechanics.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/15/2016/11/Characterisation-of-cemented-rock-fill-materials-for-the-Cosmos-nickel-mine-WA-2011-.pdf>.

25. Sainsbury D. P., Sainsbury B. L. Design and implementation of cemented rockfill at the Ballarat Gold Project // Conference: Minefill 2014. Perth, Australia, 2014, pp. 205–216. DOI: 10.36487/ACG_rep/1404_15_Sainsbury.

26. Stone D., G. M. R. The Optimization of Mix Designs for Cemented Rockfill // Minefill 1993. SAIMM, Johannesburg, South Africa, 1993, pp. 249–253.

27. Stone D. Factors that affect cemented rockfill quality in Nevada mines // Minefill 2007. The 9th International Symposium on Mining with Backfill. Montreal, Canada, 2007, pp. 1–6.

28. Yu T. R., Counter D. B. Backfill practice and technology at Kidd Creek Mines // Canadian Mining and Metallurgical Bulletin. 1983, vol. 76, no. 856, pp. 56–65.

29. Куранов А. Д. Применение численного моделирования для выбора безопасных параметров систем разработки рудных месторождений в высоконапряженных массивах // Записки Горного института. — 2014. — Т. 206. — С. 60–64.

30. Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ (Санкт-Петербург, 15–17 мая 2017 г.) / научные редакторы: А. Н. Шабаров, К. В. Морозов. — СПб: СПГУ, 2017. — 486 с.

31. Щукин С. А., Неверов А. А., Неверов С. А., Шапошник Ю. Н., Никольский А. М. Отработка подкарьерных запасов подэта их нашла так: Кузьменко, Петлеваний, Усатыйжно-камерной технологией с формированием искусственных целиков и породной закладки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №4. – С. 205–215. DOI: 10.33764/2618–981X-2021–2-4–205–215.

32. Кузьменко О. М., Петлеваний М. В., Усатый В. Ю. Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях [Электронный ресурс] // РВВ-2015. – 138 с.: [сайт]. [2015]. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/146610> (дата обращения: 15.11.2021). **УДК**

REFERENCES

1. Fall M., Célestin J. C., Pokharel M., Touré M. A. Contribution to understanding the effects of curing temperature on the mechanical properties of mine cemented tailings backfill. *Engineering Geology*. 2010, vol. 114, no. 3, pp. 397–413. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.05.016.

2. Li L. Generalized solution for mining backfill design. *International Journal of Geomechanics*. 2014, vol. 14, no 3. pp. 613–624. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943–5622.0000329.

3. Nasir O., Fall M. Modeling the heat development in hydrating CPB structures. *Computers and Geotechnics*. 2009, vol. 36, no. 7, pp. 1207–1218. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.05.008.

4. Zhu W. B., Xu J. M., Xu J. L., Chen D. Y., Shi J. X. Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 96, pp. 58–65. DOI:10.1016/j.ijrmms.2017.04.014.

5. Zhang J. X., Li B. Y., Zhou N., Zhang Q. Application of solid backfilling to reduce hard-roof caving and longwall coal face burst potential. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016, vol. 88, pp. 197–205. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.07.025.

6. Zhou N., Li M., Zhang J. X., Gao R. Roadway backfill method to prevent geohazards induced by room and pillar mining: a case study in Changxing coal mine. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2016, vol.16, no.12, pp. 2473–2484. DOI:10.5194/nhess-16–2473–2016.

7. Benzaazoua M., Bussiere B., Demers I., Aubertin M., Fried E., Blier A. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals Engineering*. 2008, vol. 21, no. 4, pp. 330–340. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.11.012.

8. Kesimal A., Yilmaz E., Ercikdi B., Alp I., Devenci H. Effect of properties of tailings and binder on the short-and long-term strength and stability of cemented paste backfill. *Materials Letters*. 2005, vol. 59, no. 28, pp. 3703–3709. DOI:10.1016/j.matlet.2005.06.042.

9. Jiang H., Fall M., Li Y., Han J. An experimental study on compressive behaviour of cemented rockfill. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 213, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.008.

10. Wu J., Feng M., Chen Z., Mao X., Han G., Wang Y. Particle Size Distribution Effects on the Strength Characteristic of Cemented Paste Backfill. *Minerals*. 2018, vol.8, no. 8 (322), pp. 1–21. DOI: 10.3390/min8080322.

11. Wu J., Feng M., Ni X., Mao X., Chen Z., Han G. Aggregate gradation effects on dilatancy behavior and acoustic characteristic of cemented rockfill. *Ultrasonics*. 2019, vol. 92, pp. 79–92. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.008.

12. Smirnova O. M. Low-Clinker Cements with Low Water Demand. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020, vol. 32, iss. 7, 0602000. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0003241.

13. Smirnova O. M., Potyomkin D. A. Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 7, pp. 874–880.
14. Li M., Zhang J., Liu Z., Zhao X., Huang P. Mechanical analysis of roof stability under nonlinear compaction of solid backfill body. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, pp. 863–868. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.029.
15. Mo S., Canbulat I., Zhang C., Oh J., Shen B., Hagan P. Numerical investigation into the effect of backfilling on coal pillar strength in highwall mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, pp. 281–286. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.07.003.
16. Zhang J., Zhang Q., Huang Y., Liu J., Zhou N., Zan D. Strata movement controlling effect of waste and fly ash backfillings in fully mechanized coal mining with backfilling face. *Mining Science and Technology*. 2011, vol. 21, pp. 721–726. DOI: 10.1016/j.mstc.2011.03.003.
17. Koval'skij E. R., Gromcev K. V., Petrov D. N. Modeling deformation of rib pillars during backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 87–101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0 – 87 – 101.
18. Ovcharenko O. V., Ajbinder I. I., Packevich P. G. Rockburst hazard at the Moroshka deposit under mining with backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 8, pp. 5–15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0 – 5-15.
19. Hajrutdinov A. M., Kongar-Sjurjun Ch. B., Kowalik T., Tjuljaeva Ju. S. Stress-strain behavior control in rock mass using different-strength backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(10):42 – 55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10 – 0-42 – 55.
20. Trushko V. L., Gospodarikov A. P., Sozonov K. V. Calculation of stress state in ore and backfill during mining in Yakovlevskoe iron ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 5, pp.111–123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05 – 0-111 – 123.
21. Lingga B. A., Derek Apel D., Sepehri M., Pu Y. Assessment of digital image correlation method in determining large scale cemented rockfill strains. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 29, no. 5, pp. 771–776. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.12.002.
22. Salvoldi B. G., Van Der Spuy B, Wilson S. Optimisation of cemented aggregate backfill at New Luika Gold Mine. *Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Cape Town, South Africa, 2019, pp. 437–450. DOI: 10.36487/ACG_rep/1910_32_Salvoldi.
23. Pagé P., Li L., Pengyu Yang P., Simon R. Numerical investigation of the stability of a base-exposed sill mat made of cemented backfill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 114, pp. 195–207. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.008.
24. Saw H., Prentice S., Villaescusa E. Characterisation of cemented rock fill materials for the Cosmos nickel mine, Western Australia. *International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering*. Hong Kong, China, 2011. pp. 1–8. Available at: <https://rockmechanics.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/15/2016/11/Characterisation-of-cemented-rock-fill-materials-for-the-Cosmos-nickel-mine-WA-2011-.pdf>.
25. Sainsbury D. P., Sainsbury B. L. Design and implementation of cemented rockfill at the Ballarat Gold Project. *Conference: Minefill 2014*. Perth, Australia, 2014, pp. 205–216. DOI: 10.36487/ACG_rep/1404_15_Sainsbury.
26. Stone D., G. M. R. The Optimization of Mix Designs for Cemented Rockfill. *Minefill 1993. SA/IMM*, Johannesburg, South Africa, 1993, pp. 249–253.
27. Stone D. Factors that affect cemented rockfill quality in Nevada mines. *Minefill 2007. The 9th International Symposium on Mining with Backfill*. Montreal, Canada, 2007, pp. 1–6.

28. Yu T. R., Counter D. B. Backfill practice and technology at Kidd Creek Mines. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*. 1983, vol. 76, no. 856, pp. 56–65.

29. Kuranov A. D. Application of numerical modeling for design of safety parameters of safety mining method in highly stressed masses. *Journal of Mining Institute*. 2014. vol. 206. pp. 60–64. [In Russ].

30 *Innovative directions in the design of mining enterprises: geomechanical support for the design and maintenance of mining operations* (St. Petersburg, May 15–17, 2017) / scientific editors: A. N. Shabarov, K. V. Morozov. St. Petersburg: SPGU, 2017, 486 p. [In Russ].

31. Shhukin S. A., Neverov A. A., Neverov S. A., Shaposhnik Ju. N., Nikol'skij A. M. Extraction of open pit bottom reserves by room-and-pillar method using hybrid backfill. *Journal of Mining Sciences*. 2020, no. 4, pp. 205–215. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618–981X-2021–2-4–205–215.

32. Kuzmenko O. M., Petl'ovanij M. V., Usatij V. Ju. Hardening backfill during mining of steep ore deposits in complex mining and geological conditions. *RVV-2015*, 138 p. Available at: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/146610> [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Зилеев Александр Геннадьевич*¹ — канд. техн. наук, доцент, ORCID ID: 0000-0001-9586-8379, e-mail: zileev_ag@pers.spmi.ru;

*Васильев Даниил Анатольевич*¹ — ведущий инженер, e-mail: Vasilev_DA4@pers.spmi.ru;
Тулин Павел Кириллович — канд. техн. наук, доцент, ORCID ID: 0000-0002-0820-4759, e-mail: Tulin_PK@pers.spmi.ru;

*Нгуен Тай Тиен*¹ — аспирант, ORCID ID: 0000-0002-5246-9252, e-mail: s185101@stud.spmi.ru;

*Комолов Василий Викторович*¹ — аспирант, e-mail: s185077@stud.spmi.ru;

¹ СПГУ, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, Россия.

Для контактов: *Зилеев Александр Геннадьевич*, e-mail: zileev_ag@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Zileev A. G.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-9586-8379, e-mail: zileev_ag@pers.spmi.ru;

*Vasiliev D. A.*¹, Leading Engineer, e-mail: Vasilev_DA4@pers.spmi.ru;

*Tulin P. K.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-0820-4759, e-mail: Tulin_PK@pers.spmi.ru;

*Nguyen Tai Tien*¹, postgraduate student, ORCID ID: 0000-0002-5246-9252, e-mail: s185101@stud.spmi.ru;

*Komolov V. V.*¹, postgraduate student, e-mail: s185077@stud.spmi.ru;

¹ St. Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, 21st line, 2, Russia.

Corresponding author: Alexander Gennadievich Zileev, e-mail: zileev_ag@pers.spmi.ru

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.05.2022.

