

УДК 622.013.364: 622.646

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ РУДЫ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ТОРЦЕВОГО ВЫПУСКА**

В. В. Лаптев, С. В. Лукичев

*Горный институт КНЦ РАН,
E-mail: v.laptev@ksc.ru, s.lukichev@ksc.ru,
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Приведены результаты численного моделирования процесса торцевого выпуска руды, полученные методом дискретных элементов. Работа включала в себя стадии разработки методики моделирования, создание и калибровку численных моделей, анализ результатов. Установлены оптимальные параметры конструктивных элементов системы разработки, способствующие снижению потерь при выпуске в условиях отработки хибинских апатит-нефелиновых месторождений. Получены некоторые закономерности поведения горной массы при ее выпуске. Представлен механизм образования потерь.

Система разработки с подэтажным обрушением, параметры конструктивных элементов, торцевой выпуск руды, потери, разубоживание, показатели извлечения, метод дискретных элементов, численное моделирование, фигура выпуска

DOI: 10.15372/FTPRPI20230406

Потери и разубоживание руды при выпуске подразделяют на конструктивные (в массиве) и эксплуатационные. Первые являются следствием геометрических параметров и взаимного расположения конструктивных элементов, вторые обусловлены особенностью поведения сыпучих материалов, последовательностью и продолжительностью выемки рудной массы из выпускных отверстий. При этом конструктивные факторы оказывают значительное влияние на эксплуатационные.

Количественные эксплуатационные потери при торцевом выпуске формируются из-за несовпадения геометрии секции отбойки с фигурой выпуска — начальным пространственным положением фрагментов горной массы (ГМ), извлеченных при выпуске. Потери образуются на стенках траншеи днища; в верхней части выпускаемого объема при несовпадении его высоты с высотой фигуры выпуска; на гребнях по подошве выработки, через которую осуществляется выпуск [1]. Потери руды из каждой панели, представляющей собой набор секций отбойки, отработываемых из одной выработки, могут быть перепущены на нижележащие подэтажи и частично выпущены вместе с их запасами.

Качественные эксплуатационные потери формируются прежде всего из-за попадания в фигуру выпуска пород через фронтальную границу секции отбойки [2]. Конструктивной особенностью секции отбойки при торцевом выпуске руды является ее малая толщина по отношению к остальным габаритам и большая фронтальная площадь, граничащая с ранее выпущенной секцией этой же панели. Именно из ранее выпущенной смежной секции наблюдается основной поток разубоживающих пород [3]. При отношении ширины секции отбойки к ее высоте, равном 0.17, отмечается наибольшее соответствие геометрии фигуры выпуска и секции отбойки во фронтальной плоскости [4–6]. Однако имеющихся знаний о механизмах формирования потерь и разубоживания в условиях подэтажной системы разработки, особенно в ее наиболее распространенном “шведском” варианте, недостаточно для создания оптимальных вариантов системы [3, 7]. В связи с этим развитие теоретических методов исследований, направленных на изучение механизма формирования потерь и разубоживания руды, остаются актуальной научной и практической задачей.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Традиционно наиболее распространенными методами исследования процесса выпуска руды являются его физическое и численное моделирование. При этом физическое моделирование не позволяет с достаточной точностью воспроизвести условия реального выпуска ГМ. С целью получения достоверных результатов необходимо применять более совершенные методы моделирования поведения ГМ при выпуске, основанные на цифровом подобию реального механизма взаимодействия кусков различной формы и размера в процессе их перемещения [8].

Для выполнения поставленной задачи выбран метод дискретных элементов (МДЭ), реализованный на платформе Rocky DEM и хорошо зарекомендовавший себя в задачах, связанных с моделированием сыпучих сред [9–12]. В качестве объекта моделирования использовался конструктивный узел (рис. 1) в системе разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. За образец взяты конструкции панелей и секций, используемые на хибинских апатит-нефелиновых месторождениях, а для моделирования характеристик ГМ — апатит-нефелиновые руды [13].

Выбор параметров моделей осуществлялся исходя из задачи оценки влияния на величину потерь углов откоса траншеи и фронтального угла наклона секции. Моделировался выпуск руды из одной панели. Количество секций отбойки в панели равнялось четырем, что достаточно для понимания закономерностей формирования фигур выпуска.

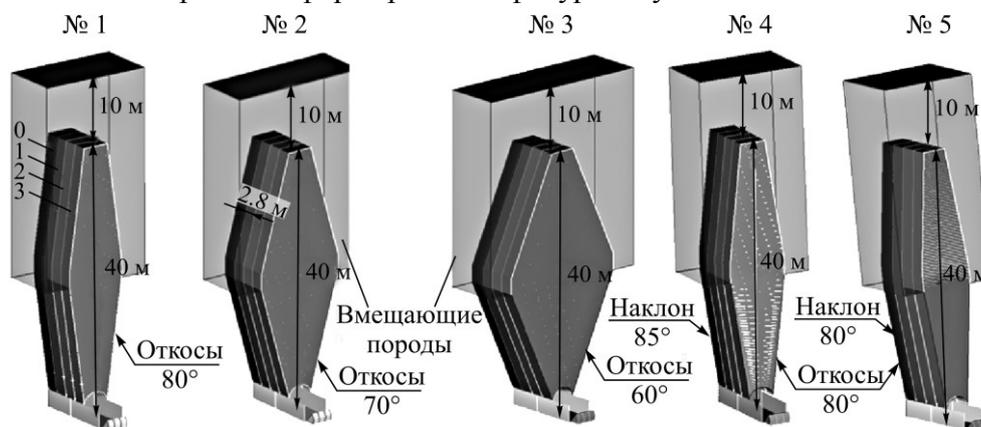


Рис. 1. Вид моделей № 1–5, где 0, 1, 2, 3 — секции отбойки (0 — представлена породой, 1–3 — рудой)

Параметры численной модели определялись согласно справочным данным, а также экспериментально [14] и приведены ниже:

Модель сил сопротивления качению	Type 3
Модель нормальных сил	Hysteretic Linear Spring
Модель сил адгезии	Constant
Модель тангенциальных сил	Linear Spring Coulomb Model
Коэффициент трения качения	0.3
Коэффициент реституции	0.15
Расстояние начала действия сил адгезии между частицами, м	0.002
Силы адгезии в долях от силы тяжести	0.1
Коэффициент статического трения	0.6
Коэффициент динамического трения	0.55
Плотность руды/породы, кг/м ³	2850/2950
Модуль Юнга руды/породы, ГПа	56.7/75.4
Коэффициент Пуассона	0.25

Физико-механические свойства сыпучего материала соответствовали ГМ, выпускаемой на Кировском руднике КФ “АО Апатит”. Гранулометрический состав ГМ — однородный, размер куска руды — 0.3 м, породы — 0.5 м, форма кусков — сферическая (выбрана для ускорения расчетов). Эксперименты показали, что подбором характеристик моделируемой ГМ можно добиться хорошего соответствия поведения сферических кусков однородного и несферических кусков неоднородного гранулометрического состава.

Моделирование выпуска руды из каждой секции отбойки (рис. 1) осуществлялось последовательно и продолжалось до тех пор, пока в дозе выпуска сохранялось содержание полезного компонента (ПК) не ниже 4% при начальном значении в руде — 15%, во вмещающих породах — 1.7%. Процесс подготовки и проведения численного моделирования включал в себя следующие стадии:

- 1) заполнение пространства модели сыпучим материалом, моделирующим ГМ;
- 2) уплотнение материала — имитация отбойки руды;
- 3) выемка ГМ из забоя с использованием модели ковша погрузочно-доставочной машины до достижения качества ПК в дозе выпуска ниже 4%;
- 4) повтор шагов 1–3 для последующих секций отбойки.

В результате моделирования перед началом выпуска секций отбойки 1–3 (рис. 1) вокруг каждой из них формировались вмещающие породы, представленные рудой и породой. При выпуске эта ГМ частично попадала в фигуру выпуска и извлекалась вместе с рудой секции отбойки.

Для определения влияния углов откоса секции на показатели извлечения сравнивались размеры фигуры выпуска для секции 3 в каждой из моделей, а также значения потерь, разубоживания, среднего качества выпускаемой ГМ для пяти вариантов конструкции панелей.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены показатели извлечения, полученные при моделировании выпуска руды из каждой секции отбойки (рис. 2). Потери и разубоживание вычислялись по соотношениям массы выпущенных кусков руды и породы, а также остатков руды в модели.

Для изучения влияния угла наклона секций на процесс выпуска на основе модели № 1 созданы варианты с наклоном секций в сторону обрушенного массива на 85° (модель № 4) и 80° (модель № 5) относительно горизонтальной плоскости. Большой наклон секций отбойки трудно осуществим при обустройстве скважин.

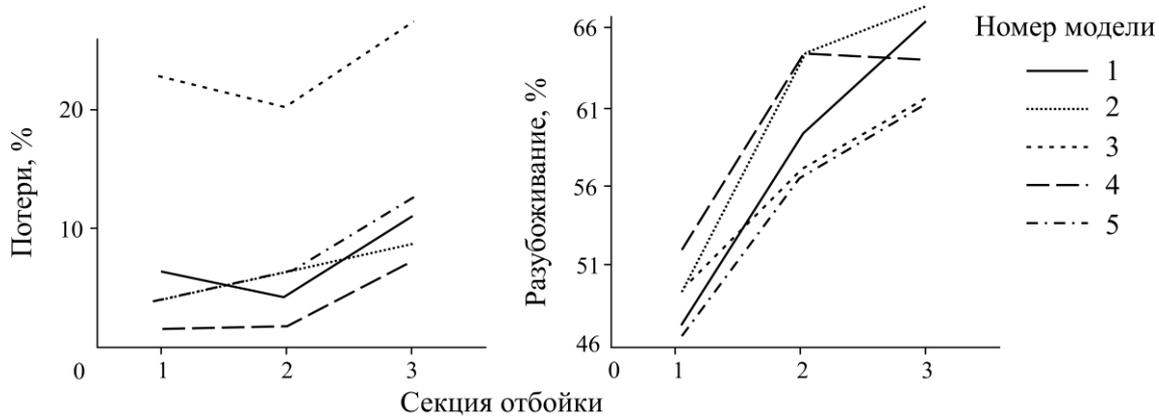


Рис. 2. Потери и разубоживание руды в моделях № 1 – 5

Фигуры выпуска, сформировавшиеся на момент остановки (при достижении качества в дозе выпуска ниже 4%), для секции 3 представлены на рис. 3.

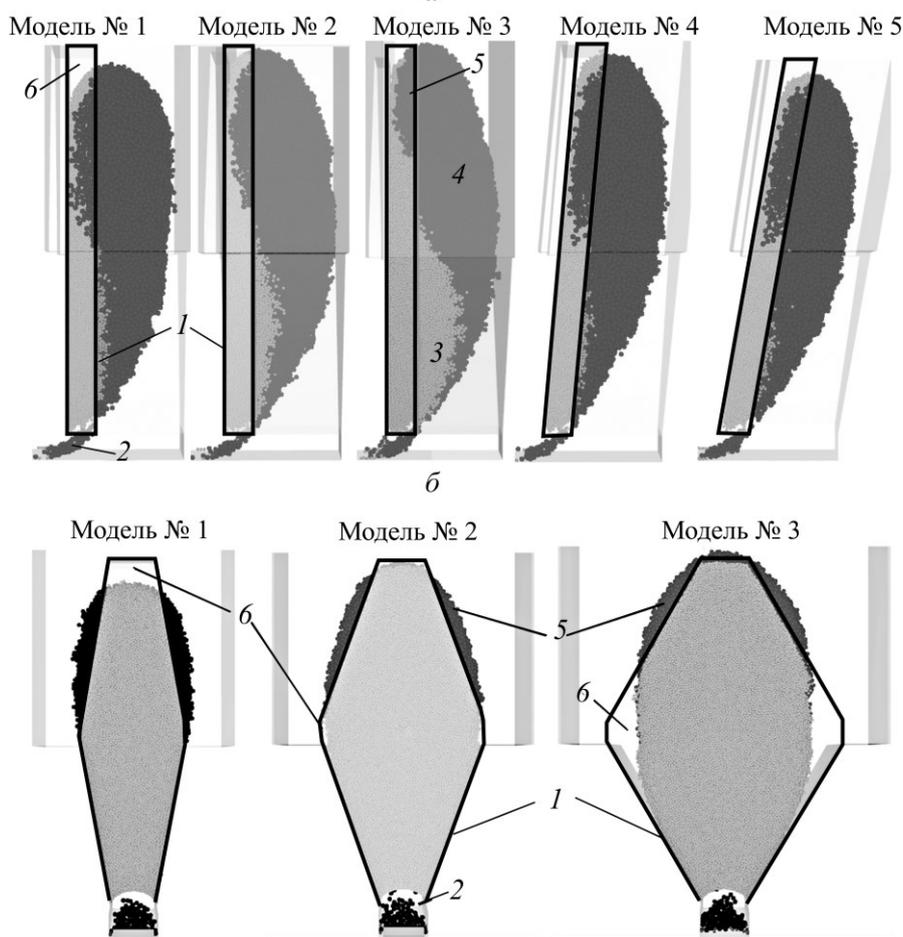


Рис. 3. Фигуры выпуска секции 3, вид сбоку (а), фронтальный вид (б): 1 — границы секции отбойки; 2 — выпускная выработка; 3 — руда, отнесенная к потерям предыдущей секции отбойки и выпущенная вместе с запасами текущей; 4 — выпускаемые разубоживающие породы (фронтальное разубоживание); 5 — выпускаемые разубоживающие породы (боковое разубоживание); 6 — несовпадение фигуры выпуска и секции отбойки — места образования потерь, светлые фрагменты — руда, темные — порода

В табл. 1 приведены основные показатели извлечения, полученные при моделировании выпуска руды для секции 3.

ТАБЛИЦА 1. Размеры фигур выпуска и основные показатели извлечения для секции 3

Модель (угол откоса)	Размер фигуры, м			Объем ГМ в фигуре, м ³	Потери, %		Разубо- живание, %	Среднее содержание ПК в выпущенной ГМ, %
	ширина	высота	глубина		по модели	по секции отбойки		
№ 1 (80°)	13.4	38.2	10.2	1515	11.0	10.0	66.5	6.2
№ 2 (70°)	18.2	40.8	12.7	2286	8.7	6.8	67.3	6.0
№ 3 (60°)	20.0	41.8	12.5	2874	23.9	14.5	63.2	6.6

Объемы ГМ, выпущенные к моменту остановки, в каждой модели были различны. Для сравнения сформировавшихся при различных углах откоса фигур выпуска в моделях № 2 и 3 рассмотрены фигуры выпуска, объем ГМ в которых равен объему ГМ в фигуре выпуска модели № 1 (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Размеры фигур выпуска после извлечения 1.5 тыс м³ ГМ, м

Модель (угол откоса)	Ширина	Высота	Глубина
№ 4 (80°)	13.6	38.2	10.2
№ 5 (70°)	16.5	33.9	10.2
№ 6 (60°)	16.0	32.9	9.2

Показатели извлечения и габариты фигуры выпуска в секции 3, полученные на моделях № 1, 4 и 5, представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Размеры фигур выпуска и основные показатели извлечения

Модель	Угол наклона секции, град.	Размер, м			Объем ГМ в фигуре (без разрыхления), м ³	Потери, %		Разубоживание, %	Среднее содержание ПК в выпущенной ГМ, %
		ширина	высота	глубина		по модели	по секции отбойки		
№ 1	90	13.4	38.9	10.2	1515	11.0	10.0	66.5	6.2
№ 4	85	13.6	39.9	9.7	1535	7.3	5.0	64.1	6.5
№ 5	80	13.3	37.9	9.4	1347	12.6	7.9	61.3	6.8

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фигура выпуска в условиях крутых углов откосов траншеи в первую очередь развивается вверх. В более “свободных” условиях (модель № 3) она формируется в ширину более активно, не ограничиваясь стенками откоса траншеи. При этом размеры фигуры меньше по ширине и глубине, чем в модели № 2, при тех же объемах извлечения.

Из рис. 3 видно, что основной объем разубоживающих пород, до начала выпуска находящихся за пределами секции 3 и попадающих в фигуру выпуска, поступает через фронтальную границу выпускаемой секции (фронтальное разубоживание). Боковое и верхнее разубоживание присутствовало, но составило меньшие объемы. Объяснить изменение показателей извлечения от слоя к слою (экстремумы на рис. 2) можно различным соотношением количества руды и породы, находящихся за пределами фронтальной стенки секции отбойки и попадающих в фигуру выпуска. При выпуске слоя 1 породы достаточно быстро проникают в буродоставочную выработку, разубоживая руду в ней, что приводит к ранней остановке выпуска. При выпуске слоя 2

за его фронтальной стенкой находится большое количество недовыпущенной руды из слоя 1, которая вовлекается в движение, не вызывая значительного снижения качества в извлекаемой ГМ. К потерям в слое 3 относятся временно неизвлекаемая руда слоя 1. При этом качество ГМ в забое в связи с доизвлечением руды слоев 1 и 2 долго не снижается менее бортового значения. Данные закономерности могут быть использованы при планировании режимов выпуска руды с целью достижения оптимальных показателей извлечения.

Для моделей № 2 и 3 (несмотря на различные углы откоса) глубина фигуры выпуска одинакова. При этом угол образующей на задней границе отличался незначительно и составил: 60° — модель № 1, 58.5° — модель № 2, 57° — модель № 3. Следовательно, фигура выпуска развивается на определенную глубину и далее не увеличивается. Разница объемов достигается за счет увеличения высоты и выполаживания углов, образующих фигуру.

При крутых углах откоса траншеи фигура выпуска в плоскости веера почти полностью совпадает с конфигурацией секции, что сводит потери на откосах траншеи почти к нулю. При угле 60° на откосах остаются достаточно объемные области с неизвлеченной рудой, т. е. относительный объем потерь с выполаживанием угла откоса возрастает.

С целью детального представления механизма формирования потерь в модели выделялись куски руды, отнесенные к потерям выпускаемой секции отбойки. Их начальное положение можно описать геометрически, если из секции “вычесть” фигуру выпуска. На момент остановки выпуска потери по секции располагаются в ее углах (при ее большой ширине), на откосах и на фронтальной стенке.

Для понимания схемы перемещения кусков руды, отнесенных к потерям, секция по горизонтали разделялась на 5 областей (рис. 4). Отслеживание перемещения кусков руды, отнесенных к потерям и находящихся в этих областях, позволило установить следующие закономерности:

- потери из области 1 опускаются вертикально к выпускному отверстию и остаются вблизи фронтальной стенки, разграничивающей массив горных пород и рудную массу в отбиваемой секции;
- куски из области 2 опускаются по траекториям, близким к вертикальным, но остаются на откосах траншеи;
- потери из области 3 в зависимости от удаленности от потока выпускаемой ГМ постепенно опускаются на откосы либо остаются на месте;
- потери из области 4, расположенные на откосах, медленно сползают по ним в направлении к выпускному отверстию;
- потери из области 5 при отбойке обычно первыми обрушаются в выработку и образуют на почве так называемую постель, в которой и остаются.

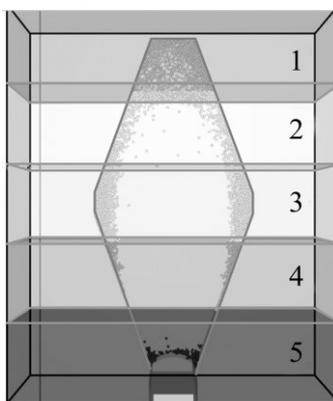


Рис. 4. Деление модели на условные области для анализа механизма формирования потерь

Потери из области 1, как правило, полностью извлекаются при выпуске последующих секций отбойки текущей панели. Потери из области 2 могут быть извлечены при выпуске последующих секций отбойки панели. Потери из областей 3–5 могут быть извлечены при выпуске нижележащих подэтажей.

Чтобы пояснить механизм формирования потерь по секции отбойки, на рис. 5 представлено изменение положения кусков руды, отнесенных к потерям секции 3 в модели № 3, через равные промежутки времени от начального положения (до обрушения секции) к конечному (остановка выпуска из-за достижения содержания полезного компонента в дозе выпуска ниже бортового).

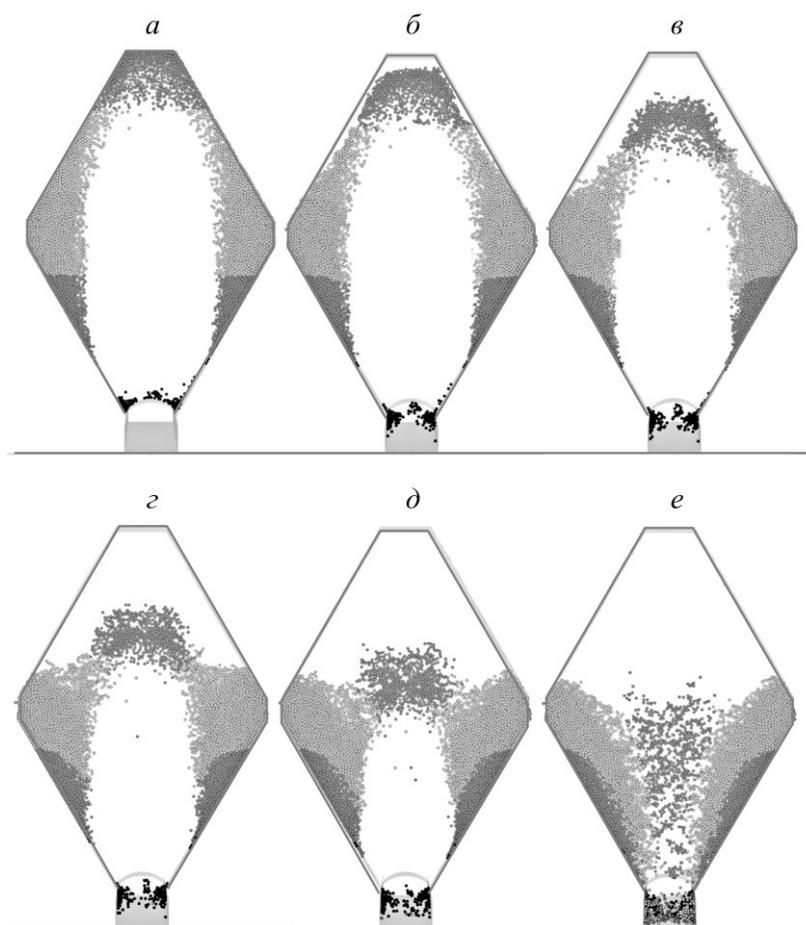


Рис. 5. Изменение положения кусков руды, отнесенных к потерям секции 3 модели № 3 (вид спереди) по мере извлечения ГМ, т: а — 0; б — 1664; в — 3328; з — 4992; д — 6656; е — 8323

ВЫВОДЫ

Метод дискретных элементов является эффективным инструментом моделирования технологических схем (включая самые сложные) выпуска ГМ с различными физическими и технологическими характеристиками.

Выполненный цикл имитационного моделирования торцевого выпуска показал, что глубина развития фигуры выпуска в сторону раздробленного массива слабо зависит от угла откоса траншеи. Чем меньше развитие фигуры выпуска во фронтальной плоскости, тем меньше ее развитие в глубину. Чем круче углы откоса траншеи, тем на большую высоту при одинаковом объеме извлечения разовьется фигура выпуска.

Остатки руды над выпускным отверстием вблизи фронтальной стенки, отделяющей массив горных пород от рудной массы, практически полностью извлекаются при выпуске последующих секций в панели при толщине секции отбойки до 3.5 м для рассматриваемых условий (высота отбиваемого слоя 20–25 м, расстояние между буродоставочными выработками 16–20 м, угол откоса траншеи 60–80°).

Наклон секции отбойки в сторону обрушенного массива на 85° относительно горизонтальной плоскости позволяет достичь большего совпадения фигуры выпуска с геометрией выпускаемой секции для рассматриваемых условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукичев С. В., Семёнова И. Э., Белгородцев О. В., Онуприенко В. С. Увеличение производственной мощности подземного рудника при освоении запасов глубоких горизонтов // Горн. журн. — 2019. — № 10. — С. 85–88.
2. Pakalnis R. T. and Hughes P. B. Sublevel stoping — SME mining engineering handbook, New York: Society of Mining, Metallurgy and Explorations, 2011. — P. 1365–1375.
3. Русин Е. П., Стажевский С. Б. О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с поэтажным обрушением // Сб. материалов XIII Междунар. науч. конгресса “Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017”. — Екатеринбург, 2017. — Т. 2. — С. 112–116.
4. Brunton, I. D., Fraser, S. J., Hodgkinson, J. H., Stewart, and P. C. Parameters influencing full scale sublevel caving material recovery at the Ridgeway gold mine, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2010, Vol. 47, No. 4. — P. 647–656.
5. Chen J. Y. and Boshkow. S. Recent development and application of bulk mining methods in the People's Republic of China, Int. Conf. Caving and Sublevel Stopping, Denver, USA: SME-AIME, 1981. — P. 393–418.
6. Quinteiro C., Hustrulid W., and Larsson L. Theory and practice of very large-scale sublevel caving, In Underground mining methods, engineering fundamentals and international case studies, SME, Littleton, Colorado, USA, 2001. — P. 381–384.
7. Малофеев Д. Е. Развитие теории и практики выпуска руды под обрушенными породами. — Красноярск, 2007. — 172 с.
8. Наговицын О. В., Степачева А. В. Формирование цифрового двойника месторождения твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 171–180.
9. Феоктистов А. Ю., Каменецкий А. А., Блехман Л. И., Васильков В. Б., Скрыбин И. Н., Иванов К. С. Применение метода дискретных элементов для моделирования процессов в горно-металлургической промышленности // Зап. Горн. ин-та. — 2011. — Т. 192. — С. 145–149.
10. Ai J., Chen J. F., Rotter J. M., and Ooi J. Y. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations, Powder Technology, 2011, Vol. 206, Issue 3. — P. 269–282.
11. Lapčević V. and Torbica S. Numerical investigation of caved rock mass friction and fragmentation change influence on gravity flow formation in sublevel caving, Minerals, 2017, Vol. 7 (56). — P. 1–18.
12. Lapčević V., Torbica S., Asadzadeh M., Dokić N., Duranović M., and Petrović M. Influence of boundary conditions in DEM models of sublevel caving on dilution and recovery, Podzemni radovi, 2018, No. 33. — P. 1–15.
13. Белгородцев О. В., Наговицын Г. О. Выбор технологии и порядка отработки подземных запасов участка Гакман Юкспорского месторождения // ГИАБ. — 2021. — № 5–1. — С. 19–28.
14. Лаптев В. В. Численное моделирование потока раздробленной горной массы в процессе выпуска руды с использованием программы ROCKY DEM // Вестн. МГТУ. — 2019. — Т. 22. — № 1. — С. 149–157.

Поступила в редакцию 14/VI 2023

После доработки 29/VI 2023

Принята к публикации 30/VI 2023