

Сравнение результатов физического моделирования и натурного эксперимента по торцевому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей

Малиновский Е. Г.¹, Ахпашев Б. А.^{1*}, Голованов А. И.¹, Гильдеев А. М.¹

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

*e-mail: 79050863461@yandex.ru

Реферат

Введение. Определение эффективных параметров систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород в условиях мощных пологих залежей является нетривиальной задачей ввиду отсутствия достаточного мирового и отечественного опыта. В связи с этим оптимальные параметры выпуска руды наиболее достоверно определяются на основе физического и математического моделирования с учетом данных натурных экспериментов.

Цель работы. На основе физического и математического моделирования с учетом данных натурных экспериментов выявить закономерности истечения горной массы в привязке к конкретным горно-геологическим условиям месторождения. С использованием полученных данных о кинематике формирования фигур выпуска определить показатели сыпучести среды, необходимые для создания математической модели выпуска руды в аналогичных условиях.

Методика проведения исследований. Проведение физического моделирования торцевого выпуска руды с определением показателей извлечения и сыпучести среды.

Результаты. Сопоставление результатов натурных экспериментов с результатами физического моделирования показало достаточную сходимость по местам образования потерь и разубоживания, по подобию закономерностей истечения отбитой руды, по формированию фигуры выпуска. На основе физического моделирования определена зависимость показателя сыпучести среды от высоты фигуры выпуска, необходимая для выполнения математического моделирования выпуска.

Выводы. Определенные в результате физического моделирования и натурных экспериментов характеристики сыпучести среды, заложенные в математическую модель выпуска, позволят осуществлять оптимизацию параметров систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород на мощных пологих месторождениях.

Ключевые слова: пологие залежи; системы разработки; этажное обрушение; торцевой выпуск; физическое моделирование; натурный эксперимент.

Введение. Физическое моделирование процесса выпуска рудной массы в системах этажного (подэтажного) обрушения, наряду с аналитическими расчетами, является одним из основных методов определения нормативных показателей извлечения.

Процессы, связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых, отличаются многообразием и сложностью их точного теоретического описания для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий и, вместе с тем, поддаются лишь частично или совсем не поддаются реальным наблюдениям за их проведением.

Возможности натурных исследований процессов при добыче руды могут быть существенно дополнены результатами физического моделирования, которые способны раскрыть не только особенности их протекания в реальных условиях, но и дать представление об общей картине их развития, а также приближенные количественные величины.

В мировой практике физико-математическому моделированию выпуска руды посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей [1–13].

Методы исследования. Объектом исследований является торцевой выпуск руды под обрушенными породами.

Основным ограничением физического моделирования является большое количество времени, необходимое для моделирования различных вариантов исполнения моделируемого процесса. В связи с этим кроме получения собственно результатов моделирования в виде зависимостей показателей извлечения от изменения параметров выпуска ставилась задача получения информации, необходимой для создания математической модели.

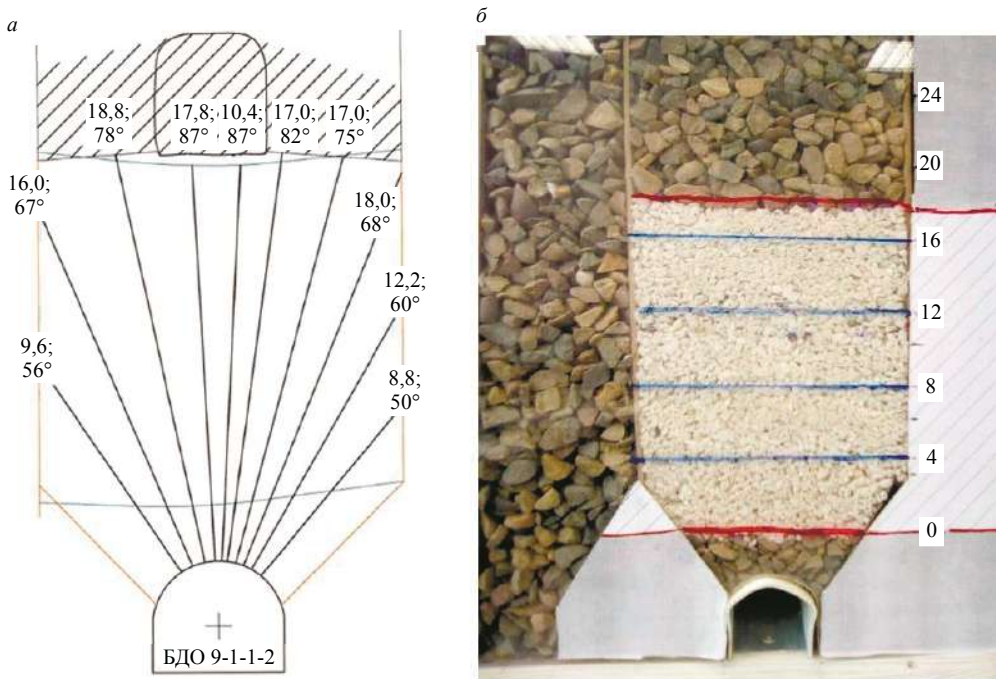


Рис. 1. Исходные условия и физическая модель:
a – разрез по вееру № 11; *б* – модель для мощности рудного тела 17 м
 Fig. 1. Initial conditions and physical model:
a – section of the layer no. 11; *б* – model for the power of the ore body 17 m

При физическом моделировании выпуска руды должны быть соблюдены масштабы моделирования механического подобия. Другие масштабы, связанные с изменениями теплового, химического характера и т. п., могут не учитываться.

Физическое моделирование проведено для условий конкретной выемочной единицы (рис. 1, *a*). Угол падения рудного тела и буродоставочного орта (БДО) – 8°. Мощность рудного тела – 17 м. Расстояние между осями буродоставочных выработок – 14,4 м. Предохранительный породный слой над выработкой – 2,8 м. Линия наименьшего сопротивления (расстояние между веерами) $W = 2,5$ м. Наклон вееров в сторону выработанного пространства – 85°.

Учитывая подвижку породного массива при взрыве в зажиме за счет разрыхления отбитой руды (коэффициент разрыхления k_p для данных условий обычно принимается равным 1,3) толщина выпускаемого слоя определяется из выражения $b = Wk_p = 3,25$ м.

Исходя из фактических размеров БДО 9-1-1-2 для проведения моделирования приняты технические характеристики погрузочно-доставочной машины (ПДМ) типа LH514E.

Для данной ПДМ изготовлен ковш, имитирующий форму и размеры в принятом масштабе моделирования. Основной размер – ширина ковша – 2,788 м.

Для визуализации процесса выпуска в качестве руды применена белая мраморная крошка, классифицированная по крупности на классы -3; +3-5; +5-7; +7-10 мм. Порода – щебень +7-10 и +10 мм.

Волюмометрическим способом определена объемная масса (плотность) руды и породы в массиве (ГОСТ 5182-78). Она составила 2,79 г/см³ для мрамора и 2,75 г/см³ для щебня.

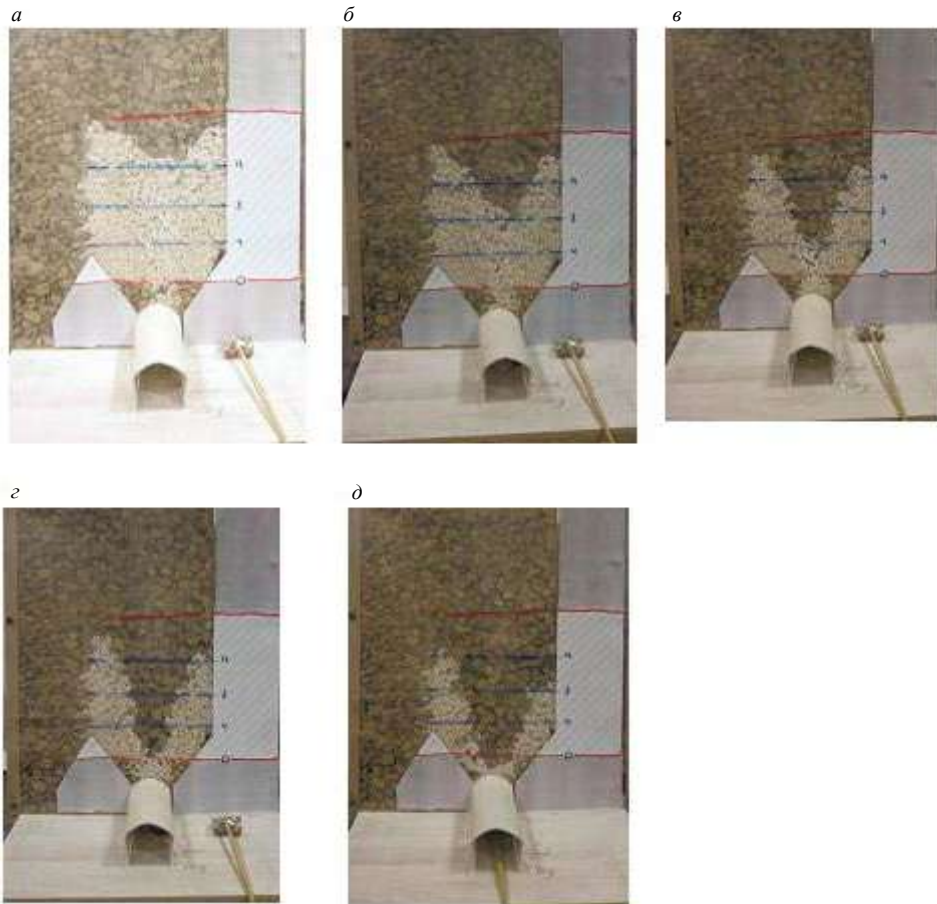


Рис. 2. Характерные этапы выпуска руды фактического гранулометрического состава из БДО 9-1-1-2, $b = 3,25$ м:

a – 40 ковшей; b – 60 ковшей; v – 86 ковшей; z – 106 ковша

Fig. 2. Typical stages of production of ore of the actual particle size distribution from BDO 9-1-1-2, $b = 3,25$ m:

a – 40 buckets; b – 60 buckets; v – 86 buckets; z – 106 buckets; d – 122 buckets

В масштабе 1 : 100 была изготовлена модель для торцевого выпуска руды при системе этажного принудительного обрушения руды и налегающих пород (рис. 1, б).

Исследования проводились для выпуска одного и трех слоев рудной массы. Для разграничения слоев отбитой руды на момент ее засыпки применялись шиберы из оцинкованного железа толщиной 1 мм, которые были обклеены со стороны потока отбитой руды наждачной бумагой для имитации трения. Для этой же цели

были обклеены и рудопородные откосы. Изоляция слоев отбитой руды и боковой породы на момент закладки модели производилась прямоугольными листами из ДВП с гладкими поверхностями толщиной 3 мм.

Физическое моделирование проведено для разной толщины отбиваемого слоя и трех гранулометрических составов отбитой рудной массы: фактического по БДО 9-1-1-2, улучшенного без негабаритов при размере кондиционного куска 700 мм и среднего по руднику, а также для четырех мощностей рудного тела. В данной статье представлены только основные результаты моделирования.

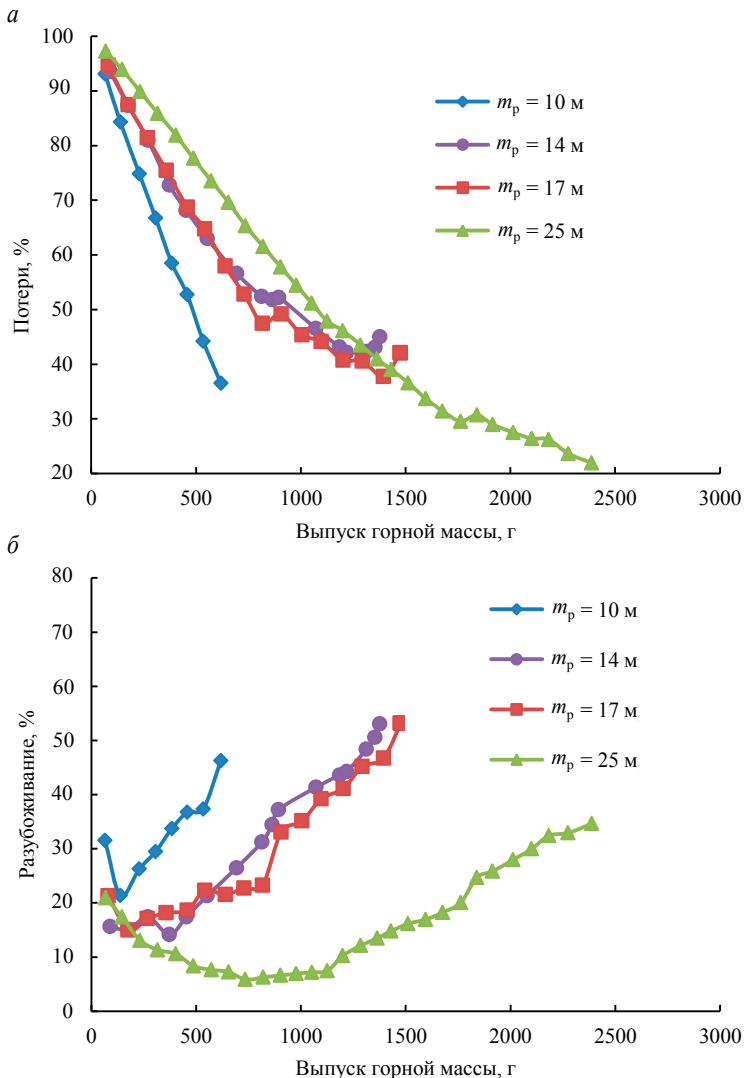


Рис. 3. Зависимость потерь – *a* и разубоживания – *b* от выпуска горной массы при разной моделируемой высоте выпускаемого слоя
 Fig. 3. Dependence between the losses – *a* and dilution – *b* and rock mass draw under various simulated height of the drawn layer

Для имитации подобия гранулометрического состава отгружаемой горной массы были использованы фактические данные.

Распределение гранулометрического состава показывает увеличение крупности кусков рудной массы в зависимости от продолжительности ее извлечения относительно начального момента.

Для имитации фактической крупности отгружаемой горной массы модель была разделена на части пропорционально участкам с тремя характерными распределениями granulometricheskogo состава.

Первая – нижняя часть слоя (припочвенная). Гранулометрический состав: –300 (51,25 %), –700 (46,25 %), +700 (2,5 %); $43/189 \times 17 = 3,9$ м, где 43 – количество ковшей на одном участке, 189 – общее количество ковшей, 17 – мощность рудного тела, м.

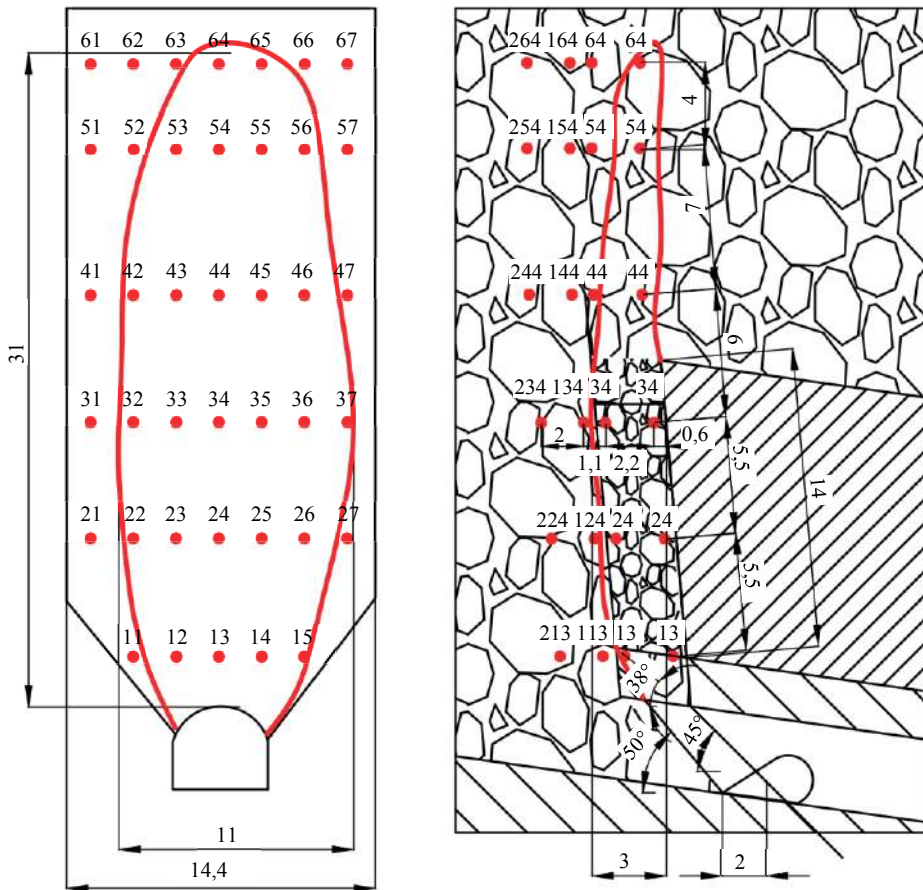


Рис. 4. Формирование фигуры выпуска рудной массы фактического granulometricheskogo состава из БДО 9-1-1-2 при $m_p = 14$ м; $b = 3,25$ м

Fig. 4. Shape edition of the rock mass of the actual particle size composition of BDO 9-1-1-2, with $m_p = 14$, $b = 3,25$ m

Вторая – средняя. Гранулометрический состав –300 (39,29 %), –700 (48,07 %), +700 (12,64 %); $91/189 \times 17 = 8,2$ м.

Третья – верхняя (подкровельная). Гранулометрический состав –300 (0 %), –700 (53,00 %), +700 (47,00 %); $55/189 \times 17 = 4,9$ м.

При $W = 2,5$ м и $b = 3,25$ м объем руды в массиве на веер составляет $787,8$ м³.

Всего израсходовано $3582,48$ г руды, на один слой – $1194,16$ г. Плотность руды в отбитом виде составила $\rho_{отб} = 1,52$ г/см³.

При установленной плотности мрамора (руды) в массиве $\rho_{мас} = 2,79$ г/см³ коэффициент разрыхления руды $k_p = 1,83$.

Породная часть модели засыпалась следующим образом:

- отбитая порода предохранительного слоя над БДО – щебенкой крупностью +7–10 мм;
- обрушенные породы налегающей толщи – щебенкой крупностью +7–15 мм.

Фотографии процесса выпуска руды из БДО 9-1-1-2, $b = 3,25$ м, когда породная воронка внедрения достигает контрольных высотных отметок по мощности рудного тела, показаны на рис. 2.

Моделирование выпуска рудной массы для различных мощностей залежи проведено для четырех мощностей рудного тела m_p : 10, 14, 17 и 26 м (рис. 3).

Таблица 1. Расчет показателя свободы перемещения частиц среды в процессе выпуска по варианту с высотой выпускаемого слоя 10 м и толщиной выпускаемого слоя 3,25 м

Table 1. The analysis of the medium particles freedom indicator in the process of drawing for the variant with the height of the drawn layer of 10 m and the thickness of the drawn layer of 3.25 m

Наименование	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
Высота выпускаемого слоя, м	14,0	14,5	15,0	16,0	16,5
Толщина выпускаемого слоя, м	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Глубина живого сечения потока, м	2,59	2,56	2,52	2,36	2,33
Глубина внедрения погрузочного органа в навал руды, м	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Высота выработки, м	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Угол откоса рудной постели, град	40	39	40	40	41
Угол откоса сыпучего материала, град	46,5	45	46	45	46
Показатель m	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12

Во всех трех опытах принят следующий гранулометрический состав руды: –3 мм (30 %); +3–5 (60 %); +5–7 (10 %). Предварительно готовилась навеска из трех фракций по их процентному соотношению, и смесь перемешивалась. Затем готовилась модель, и по разнице веса навески и остатка определялся фактический объем руды в исследуемом слое.

При $m_p = 10$ м плотность руды в отбитом виде составила $\rho_{отб} = 1,65$ г/см³. При этом коэффициент разрыхления $k_p = 1,69$. При $m_p = 14$ м $\rho_{отб} = 1,82$ г/см³, $k_p = 1,53$. При $m_p = 17$ м $\rho_{отб} = 1,68$ г/см³, $k_p = 1,66$. При $m_p = 26$ м $\rho_{отб} = 1,65$ г/см³, $k_p = 1,69$.

Для выявления кинетики формирования фигуры выпуска по мере отгрузки рудной массы при ее засыпке укладывались окрашенные в синий цвет и подписанные реперы. Реперы изготавливались из подготовленного для моделирования материала: расположенные в руде – из мрамора, в породе – из щебня.

В период подготовки к моделированию выпуска руды из БДО 9-1-1-2 одного слоя фактического гранулометрического состава при $m_p = 17$ м, $b = 3,25$ м (рис. 4) реперы укладывались по руде и по породе. Всего установлено шесть слоев. Каждый слой укладывался горизонтально: первый слой – 4 ряда по 5 реперов в ряду; второй – 4 ряда по 7 реперов.

Укладка каждого ряда производилась в следующем порядке. Вначале над осью выработки помещался центральный репер, затем с интервалом 2 см от него в обе стороны – остальные.

Во время выпуска каждой модели фиксировались не только вес в каждом ковше рудной массы, руды и породы, но и на каком этапе происходило извлечение реперов. На основании компьютерной обработки полученных результатов физи-

ческого моделирования построены соответствующие схемы формирования фигуры выпуска для различных горно-технологических условий.

В дальнейшем при проведении серии опытов для каждой из мощностей рудного тела 10, 14, 17 и 26 м с целью определения высоты фигур выпуска реперы укладывались только по породе выше рудного тела, в створе выпускного отверстия, в 2 ряда на слое по 4 репера в ряду, с расстояниями по вертикали 5 м выше контакта *руда–порода*, 2 ряда через 2 м и 6 рядов через 1 м. Высота фигуры выпуска определялась по выходу любого из реперов слоя. Используемые параметры: H_w – высота выработки, м; m – показатель, характеризующий степень подвижности частиц выпускаемой среды; Q , Y – угол откоса рудной постели и угол естественного откоса сыпучего материала (определяются исходя из физического моделирования); L_w – глубина внедрения погрузочного органа в навал руды; L_{wn} – глубина живого сечения потока.

Таблица 2. Расчет показателя свободы перемещения частиц среды в процессе выпуска по варианту с высотой выпускаемого слоя 14 м и толщиной выпускаемого слоя 3,25 м

Table 2. The analysis of the medium particles freedom indicator in the process of drawing for the variant with the height of the drawn layer of 14 m and the thickness of the drawn layer of 3.25 m

Наименование	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
Высота выпускаемого слоя, м	21	22	23	24	25
Толщина выпускаемого слоя, м	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Глубина живого сечения потока, м	1,79	1,77	1,60	1,41	1,42
Глубина внедрения погрузочного органа в навал руды, м	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Высота выработки, м	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Угол откоса рудной постели, град	40	43	42	41	42
Угол откоса сыпучего материала, град	41	44	42	40	41
Показатель m	0,15	0,14	0,15	0,16	0,15

Используя полученные в процессе выпуска параметры, в каждом опыте определялся показатель свободы перемещения частиц среды m . Расчет показателя свободы перемещения частиц среды m по каждому варианту приведен в табл. 1–4.

При принятых условиях моделирования показатель свободы перемещения частиц среды в процессе выпуска определяется по следующей зависимости: $m(H_\phi) = 0,0773 \times \ln(H_\phi) - 0,0917$, где H_ϕ – высота фигуры выпуска, м.

Данная эмпирическая зависимость заложена в математический аппарат моделирования выпуска руды в условиях, аналогичных физическому моделированию.

Анализ результатов. Результаты физического моделирования позволяют сделать следующие выводы. Кинематика развития фигуры выпуска определяет соотношение потерь и разубоживания при добыче под обрушенными породами. При торцевом выпуске для рассматриваемых условий увеличение высоты выше верхнего геологического контакта руды и породы приводит к повышению разубоживания налегающими обрушенными породами. Увеличение толщины – к дополнительному прихвату породы с торца выработки. Рост ширины позволяет снизить потери отбитой руды на боковых границах отбиваемого слоя.

Анализ формирования фигур выпуска для различных горно-технологических условий, проведенный на основе выполненного физического моделирования, показывает следующее.

Изменение мощности рудного тела с 10 до 17 и далее до 26 м при выпуске рудной массы приводит к снижению потерь руды. Потери и разубоживание сни-

жаются при увеличении высоты слоя при одинаковой ширине слоя, что говорит об увеличении степени вписывания фигуры выпуска в объем слоя.

Визуальные наблюдения за процессом выпуска рудной массы и полученные графические зависимости формирования фигуры выпуска показывают высокую концентрацию потерь отбитой руды на гребнях рудо-породных откосов. Данные

Таблица 3. Расчет показателя свободы перемещения частиц среды в процессе выпуска по варианту с высотой выпускаемого слоя 17 м и толщиной выпускаемого слоя 3,25 м

Table 3. The analysis of the medium particles freedom indicator in the process of drawing for the variant with the height of the drawn layer of 17 m and the thickness of the drawn layer of 3.25 m

Наименование	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
Высота выпускаемого слоя, м	21,5	22,5	23,5	24,5	25,5
Толщина выпускаемого слоя, м	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Глубина живого сечения потока, м	1,04	1,02	0,84	0,74	0,67
Глубина внедрения погрузочного органа в навал руды, м	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Высота выработки, м	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Угол откоса рудной постели, град	42	41	42	45	43
Угол откоса сыпучего материала, град	39	38	38	40	38
Показатель m	0,145	0,141	0,150	0,152	0,152

потери могут быть уменьшены при оптимальном соотношении высоты, ширины и толщины отбиваемого слоя; при снижении расстояния между буродоставочными выработками и увеличении их ширины в условиях их устойчивого состояния.

Таблица 4. Расчет показателя свободы перемещения частиц среды в процессе выпуска по варианту с высотой выпускаемого слоя 26 м и толщиной выпускаемого слоя 3,25 м

Table 4. The analysis of the medium particles freedom indicator in the process of drawing for the variant with the height of the drawn layer of 26 m and the thickness of the drawn layer of 3.25 m

Наименование	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
Высота выпускаемого слоя, м	26	27	28	29	30
Толщина выпускаемого слоя, м	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Глубина живого сечения потока, м	1,20	1,23	1,02	1,04	0,74
Глубина внедрения погрузочного органа в навал руды, м	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Высота выработки, м	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Угол откоса рудной постели, град	40	42	41	42	45
Угол откоса сыпучего материала, град	38	40	38	39	40
Показатель m	0,17	0,16	0,17	0,16	0,17

Заключение. Сопоставление результатов натурных экспериментов с результатами физического моделирования показало достаточную сходимость по местам образования потерь и разубоживания, по подобию закономерностей истечения отбитой руды, по формированию фигуры выпуска. Следует отметить, что по отдельным отбиваемым слоям фактические величины потерь и разубоживания существенно отличались от экспериментальных, что объясняется качеством дробления при отбойке и выходом негабарита.

Потери отбитой руды также могут быть снижены за счет увеличения углов наклона рудо-породных откосов. Однако это приведет к увеличению потерь в неот-

битом виде, а возможно, и к увеличению разубоживания породами почвы при ослабленных межслоевых контактах *руда–порода*.

На основе физического моделирования определена зависимость показателя сыпучести среды от высоты фигуры выпуска и выполнено математическое моделирование выпуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Именитов В. Р., Ковалев И. А., Уралов В. С. Моделирование обрушения и выпуска руды. М.: МГИ, 1961. 151 с.
2. Малахов Г. М., Безух П. В., Петренко П. Д. Теория и практика выпуска руды. М.: Недра, 1968. 310 с.
3. Куликов В. В. Выпуск руды. М.: Недра, 1980. 303 с.
4. Кабелко С. Г., Дунаев В. А., Герасимов А. В. Компьютерная технология прогнозной оценки показателей выпуска руды при разработке месторождений системами с обрушением руды и породы // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 8. С. 54–61.
5. Башков В. И. Расчет параметров и конструктивное оформление варианта системы разработки подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 2 (108). С. 75–78.
6. Савич И. Н., Мустафин В. И. Перспективы применения и обоснование проектных решений при этапном и подэтажном торцевом выпуске руды // ГИАБ. 2015. № S1. С. 419–429.
7. Голик В. И., Белодедов А. А., Логачев А. В., Шурыгин Д. Н. Совершенствование параметров выпуска руд при подэтажном обрушении с торцевым выпуском // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2018. № 1. С. 150–159.
8. Ермакова И. А. Установление параметров потока при выпуске руды в системах разработки с обрушением // Техника и технология горного дела. 2018. № 1. С. 4–11.
9. Kvapil R. Gravity flow of granular material in hoppers and bins. Part 1. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1965. Vol. 2. P. 35–41.
10. Marano G. The interaction between adjoining draw points in free flowing materials and its application to mining. Chamber of Mines Journal. Zimbabwe. 1980. P. 25–32.
11. Laubscher D. H. Cave mining – the state of the art. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1994. Vol. 94. No. 10. P. 279–293.
12. Rustan A. Gravity flow of broken rock – what is known and unknown. In Proceedings MassMin 2000, Brisbane. P. 557–567. Ed. G. Chitombo. The AusIMM, Melbourne. 2000.
13. Power G. R. Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modelling and full scale experiments. PhD thesis. The University of Queensland, Brisbane. 2004.
14. Малофеев Д. Е. Развитие теории выпуска руды под обрушенными породами: монография. Красноярск: СФУ, 2007. 172 с.

Поступила в редакцию 9 июля 2019 года

Сведения об авторах:

Малиновский Евгений Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подземной разработки месторождений Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: meg2054@yandex.ru

Ахпашев Богдан Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подземной разработки месторождений Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: 79050863461@yandex.ru

Голованов Алексей Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подземной разработки месторождений Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: sfu-prm@yandex.ru

Гильдеев Александр Маликович – горный инженер, ассистент кафедры подземной разработки месторождений Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета. E-mail: gildeevam@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44

Comparing the results of physical modeling and full-scale experiment on ore face draw in the system of block caving for flat deposits

Evgenii G. Malinovskii¹, Bogdan A. Akhpashev¹, Aleksei I. Golovanov¹, Aleksandr M. Gildeev¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract

Introduction. The task of ore and host rock caving method effective parameters determination in the conditions of thick flat deposits is by no means trivial due to a lack of adequate international and local

experience. Optimal parameters of ore draw are therefore best determined based on physical and mathematical modeling, taking into account the data of full-scale experiments.

Research aim. Based on physical and mathematical modeling and full-scale experiment data, the present research aims to identify the patterns of rock mass draw in the context of particular mining and geological conditions of a deposit. Using the obtained data on discharge figures formation kinematics, the research aims to determine the medium flowability indicators required to create a mathematical model of ore draw in similar conditions.

Research methodology includes physical modeling of the ore face draw with of the medium extraction and flowability indicators determination.

Results. Comparison of full-scale experiments results with physical modeling results revealed sufficient convergence in the areas of losses and dilution, in the similarity of broken rock draw patterns, in the draw figure formation. Base on physical modeling, the dependence between the medium flowability indicator and the discharge figure height required to mathematically simulate the draw.

Summary. The medium flowability characteristics, defined during physical modeling and full-scale experiments and incorporated in the mathematical model of draw, will allow to optimize the parameters of the development systems with ore and host rocks caving at thick flat deposits.

Key words: flat deposits; system of development; block-caving; face draw; physical modeling; full-scale experiment.

REFERENCES

1. Imenitov V. R., Kovalev I. A., Uralov V. S. *Modeling ore caving and discharge*. Moscow: MSU Publishing; 1961. (In Russ.)
2. Malakhov G. M., Bezukh R. V., Petrenko P. D. *Theory and practice of ore discharge*. Moscow: Nedra Publishing; 1968. (In Russ.)
3. Kulikov V. V. *Ore discharge*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
4. Kabelko S. G., Dunaev V. A., Gerasimov A. V. Computer technology of forecast evaluation of ore drawing indicators at the development of deposits by systems with ore and rock caving. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2014; 8: 54–61. (In Russ.)
5. Bashkov V. I. Parameters analysis and design of the variant of sublevel caving development with face draw of the ore. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2015; 2 (108): 75–78. (In Russ.)
6. Savich I. N., Mustafin V. I. Perspectives of use and rationale design solutions of block (level) and sublevel face draw. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; S1: 419–429. (In Russ.)
7. Golik V. I., Belodedov A. A., Logachev A. V., Shurygin D. N. Improvement of parameters of production of ores at the subfloor collapse with face release. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2018; 1: 150–159. (In Russ.)
8. Ermakova I. A. Setting of flow parameters during release of ore in caving systems. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela = Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2018; 1: 4–11. (In Russ.)
9. Kvapil R. Gravity flow of granular material in hoppers and bins. Part 1. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1965; 2: 35–41.
10. Marano G. The interaction between adjoining draw points in free flowing materials and its application to mining. *Chamber of Mines Journal. Zimbabwe*. 1980; 25–32.
11. Laubscher D. H. Cave mining – the state of the art. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1994; 94 (10): 279–293.
12. Rustan A. Gravity flow of broken rock – what is known and unknown. In: *Proceedings MassMin 2000, Brisbane*. P. 557–567. Ed. G. Chitombo. The AusIMM, Melbourne. 2000.
13. Power G. R. *Modeling granular flow in caving mines: large scale physical modeling and full scale experiments*. PhD thesis. The University of Queensland, Brisbane. 2004.
14. Malofeev D. E. *Developing the theory of ore draw under the caved rock: monograph*. Krasnoyarsk: SFU Publishing; 2007. (In Russ.)

Received 9 July 2019

Information about authors:

Evgenii G. Malinovskii – PhD (Engineering), Associate professor, associate professor of the Department of Underground Mining, School of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: meg2054@yandex.ru

Bogdan A. Akhpashev – PhD (Engineering), Associate professor, associate professor of the Department of Underground Mining, School of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: 79050863461@yandex.ru

Aleksei I. Golovanov – PhD (Engineering), Associate professor, associate professor of the Department of Underground Mining, School of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: sfu-prm@yandex.ru

Aleksandr M. Gildeev – mining engineer, assistant lecturer, Department of Underground Mining, School of Mining, Geology and Geotechnology, Siberian Federal University. E-mail: gildeevam@gmail.com

Для цитирования: Малиновский Е. Г., Ахпашев Б. А., Голованов А. И., Гильдеев А. М. Сравнение результатов физического моделирования и натурального эксперимента по торцевому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 34–44. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44

For citation: Malinovskii E. G., Akhpashev B. A., Golovanov A. I., Gildeev A. M. Comparing the results of physical modeling and full-scale experiment on ore face draw in the system of block caving for flat deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 34–44 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-34-44