

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПУСКА РУДЫ ПОД ОБРУШЕННЫМИ ПОРОДАМИ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕЖДУЭТАЖНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ

Б. А. Ахпашев✉, А. И. Голованов, И. И. Демченко

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

✉ bg1967@ya.ru

Аннотация. Работа посвящена физико-математическому моделированию выпуска рудной массы при погашении междуэтажных целиков (МЭЦ) при этажно-камерной системе разработки. При проведении исследований первоначально применено физическое моделирование выпуска рудной массы при отработке МЭЦ в масштабе 1:100. Для дальнейшего экономико-математического моделирования отработки междуэтажного целика разработана 3D-модель выпуска рудной массы. Математическое моделирование процесса выпуска рудной массы позволило установить зависимости формирования величин потерь и разубоживания от величины выпущенной горной массы при различных параметрах рудных тел и условий их залегания. Полученные результаты физико-математического моделирования использовались при нормировании потерь и разубоживания для данной системы разработки.

Ключевые слова: подземная разработка, системы разработки, выемка целиков, междуэтажный целик, потери и разубоживание, физико-математическое моделирование

Для цитирования: Ахпашев БА, Голованов АИ, Демченко ИИ. Физико-математическое моделирование выпуска руды под обрушенными породами при отработке междуэтажных целиков при этажно-камерной системе разработки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(2):26-32. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-26-32>.

PHYSICO-MATHEMATICAL MODELING OF ORE DRAWING UNDER COLLAPSED ROCKS DURING THE DEVELOPMENT OF INTER-FLOOR PILLARS WITH A FLOOR-CHAMBER MINING SYSTEM

В. А. Akhpashev✉, А. И. Golovanov, I. I. Demchenko

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ bg1967@ya.ru

Abstract. The work is devoted to the physico-mathematical modeling of ore drawing under collapsed rocks during the development of inter-floor pillars (IFP) with a floor-chamber mining system. During the research, the physical modeling of the ore drawing during the development of the IFP on a scale of 1:100 was initially applied. A 3D model of ore mass production has been developed for further economic and mathematical modeling of the development of the inter-floor pillars. Mathematical modeling of the ore drawing release process made it possible to establish the dependences of the formation of loss and dilution values on the amount of released rock mass under various parameters of ore bodies and their occurrence conditions. The obtained results of physico-mathematical modeling were used in the normalization of losses and quality for this development system.

Keywords: underground development, development systems, pillar extraction, inter-floor pillars, loss and dilution values, physical and mathematical modeling

For citation: Akhpashev BA, Golovanov AI, Demchenko II. Physico-mathematical modeling of ore drawing under collapsed rocks during the development of inter-floor pillars with a floor-chamber mining system. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(2):26-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-26-32>.

Введение

Исследования, направленные на повышение эффективности выпуска руды под обрушенными породами при отработке междуэтажных целиков (МЭЦ) и междукамерных целиков (МКЦ), являются весьма актуальными на современном этапе развития горного производства.

Определению закономерностей истечения руды при выпуске под обрушенными породами посвящены многочисленные исследования [1–17].

Системы разработки подэтажных штреков и этажно-камерные широко применяются на отечественных и зарубежных рудниках при подземной разработке месторождений. Данные системы находят применение на мощных и средней мощности рудных телах при различных углах падения залежи. При своей достаточно высокой эффективности, особенно на стадии отработки камер, эти системы имеют существенные потери и разубоживание на стадии погашения целиков.

Последовательность отработки блока: после отработки запасов камеры производят отработку МЭЦ с выпуском под обрушенными породами с последующим извлечением запасов МКЦ.

Цель исследований: определение зависимостей величин потерь и разубоживания от мощности рудного тела при погашении междуэтажных целиков.

Задачи исследований: проведение физического и экономико-математического моделирования процесса выпуска запасов МЭЦ под обрушенными породами для различных мощностей и углов падения залежи; установление зависимостей величин потерь и разубоживания от угла падения и мощности рудного тела.

Материал и методы исследований

К исследованию был принят вариант системы с расположением камер по простиранию рудных тел мощностью до 15 м, с наклонным (45°) днищем при высоте этажа 30 м.

В качестве исходного материала для физического моделирования выпуска рудной массы были приняты породные и рудные (вкрапленная медно-никелевая руда) керны Масловского месторождения.

После дробления кернов полученный материал классифицировался посредством грохочения на классы:

- порода +7–10 и +10–15 мм;
- руда +1–3; +3–5; +5–6; +6–10 мм.

Для обеспечения возможности разделения руды и породы в процессе проведения эксперимента, а также визуализации процесса выпуска порода как более крупная была окрашена водоземulsionной краской в белый цвет.

Оборудование для доставки отбитой горной массы

Погрузка и доставка отбитой рудной массы выполнялась с использованием погрузочно-доставочных машин (ПДМ) Caterpillar (США) и Epiroc (Швеция) с ковшами 5,8 и 6,4 м³, грузоподъемностью до 14 т, что обеспечивало необходимую производительность при транспортировке горной массы от забоя до рудоспуска.

Для моделирования был изготовлен ковш ПДМ EpirocST14, имитирующий форму и размеры в принятом масштабе моделирования (рис. 1). Основной размер – ширина ковша – 3,040 м.

Физическое моделирование выпуска рудной массы при отработке запасов междуэтажного целика учитывало четыре стадии его погашения (рис. 2).

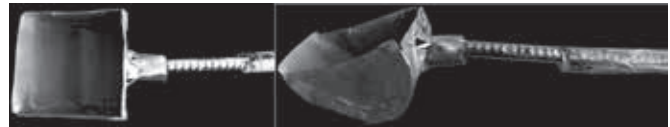


Рис. 1. Ковш погрузочно-доставочной машины для физического моделирования /

Fig. 1. Bucket loading and delivery machine for physical simulation

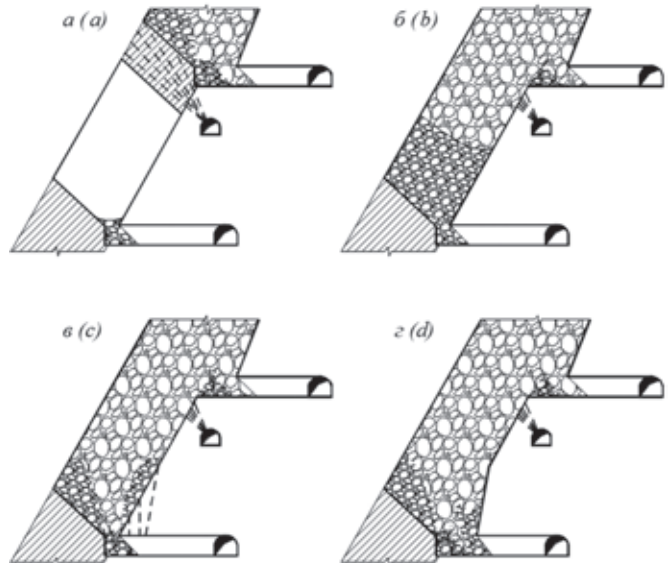


Рис. 2. Стадии отработки:

а – обуривание; б – обрушение; в – основной выпуск и обуривание лежащего бока; г – довыпуск руды с лежащего бока /
Fig. 2. Mining stages: a – drilling; b – collapse; c – main release and drilling of the recumbent side; d – additional release of ore from the recumbent side

Чертеж станда для физического моделирования выпуска рудной массы приведен на рисунке 3.

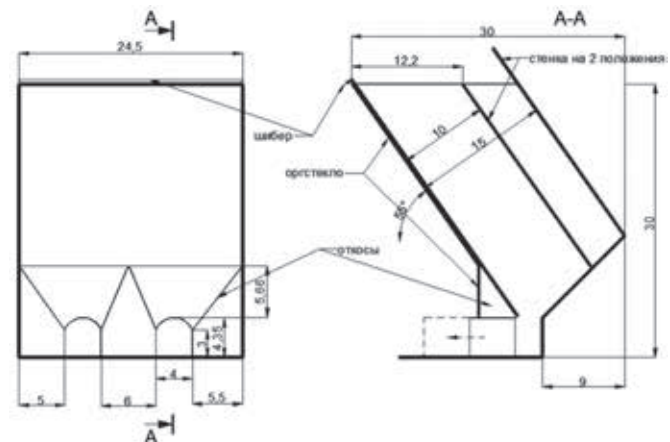


Рис. 3. Чертеж станда для физического моделирования выпуска рудной массы /

Fig. 3. Drawing of a stand for physical modeling of ore drawing

3D-схема станда для физического моделирования выпуска рудной массы при погашении МЭЦ показана на рисунке 4.

Порядок засыпки модели:

1. Погрузочные орты изолируются от камеры легкоизвлекающимся материалом.
2. Модель наклоняется в сторону наблюдателя, и происходит засыпка породы в откосы над ортами до тех пор, пока можно было закрыть шибер.

3. Шибер задвигается до кровли погрузочных ортов.
4. Модель устанавливается горизонтально.
5. Модель засыпается отбитой рудой МЭЦ.

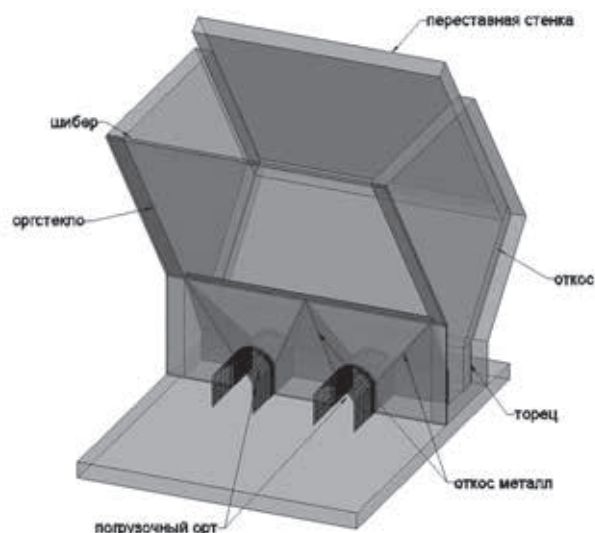


Рис. 4. 3D-модель стенда для физического моделирования выпуска руды /
Fig. 4. 3D model of the stand for physical modeling of ore drawing

Предварительная навеска руды среднего гранулометрического состава составляла при толщине МЭЦ, равной 11 м, и мощности рудного тела 10 и 15 м – 7 кг и 10 кг соответственно.

Модель засыпалась до уровня, начерченного на внутренней стороне модели, соответствующего объему погашения камерных запасов от обрушения МЭЦ; далее в модель засыпались обрушенные породы.

Порядок отработки модели:

1. Из погрузочных ортов равномерно-последовательно осуществлялся выпуск рудной массы до предельного разубоживания, после чего выпуск приостанавливался.

2. Извлекался шибер, погрузочные орты отодвигались до границы откосов, и выпуск продолжался до наступления предельного разубоживания.

Для моделирования выпуска рудной массы при погашении междуэтажного целика при разной мощности рудного тела была изготовлена одна модель. Различия при моделировании по мощности рудного тела регулировались положением задней стенки модели.

В процессе эксперимента в качестве дозы выпуска было принято 6 ковшей.

В каждой дозе выпуска отдельно взвешивались руда и порода с точностью до 0,01 г.

Величины потерь и разубоживания по результатам моделирования определялись по следующим формулам:

$$\pi = \frac{B - D_p}{B} \cdot 100, \% \quad (1)$$

$$p = \frac{B}{D} \cdot 100, \% \quad (2)$$

где B – количество руды, засыпанной в модель, г;

D_p – количество руды, выпущенной из модели, г;

B – количество породы, выпущенной из модели, г;

D – количество рудной массы, выпущенной из модели, г.

Для физического моделирования были приняты следующие варианты погашения МЭЦ: при угле падения залежи 55° и мощности рудного тела 10 м и 15 м.

В статье приводятся результаты физического моделирования выпуска отбитой рудной массы при погашении МЭЦ при мощности рудного тела 15 м.

Предварительно готовилась навеска руды из четырех фракций массой 10 тыс. г. Загружалась модель. Масса руды, засыпанной в модель, определялась как разность между 10 тыс. г и массой оставшейся руды.

Всего для мощности рудного тела 15 м было проведено 5 экспериментов.

Ниже приведены данные по одному эксперименту. Для проведения исследования была загружена модель. Масса оставшейся навески руды составила 1 694 г. Масса загруженной руды в модель – 8 306 г.

Характерные фотографии процесса выпуска руды показаны на рисунке 5.

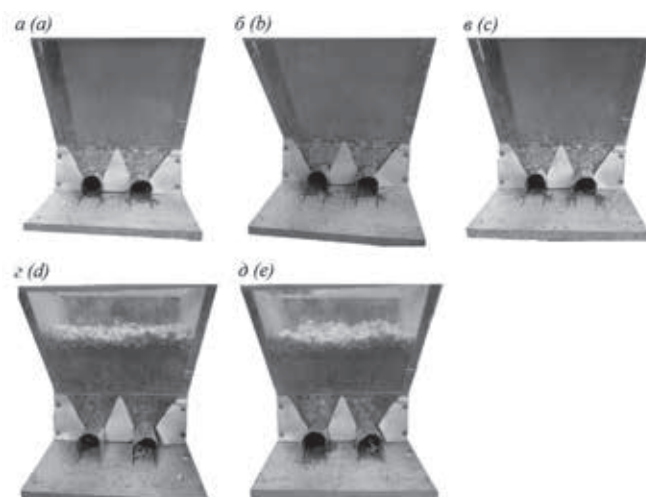


Рис. 5. Характерные этапы выпуска при погашении междуэтажного целика при $m_p = 15$ м: а – 120 ковш; б – 240 ковш; в – 360 ковш; г – 540 ковш; д – 660 ковш /

Fig. 5. Typical release stages when the inter-floor rear sight is extinguished at $m_p = 15$ m: а – 120 bucket; б – 240 bucket; в – 360 bucket; д – 540 bucket; е – 660 bucket

До извлечения шибера процесс выпуска невозможно наблюдать через оргстекло. Фотографии были сделаны горизонтально, поэтому зрительно вертикально расположенные стенки модели кажутся наклонными. Всего из модели было выпущено 732 ковша горной массы.

Укрупненные результаты выпуска рудной массы приведены в таблице 1.

Сводные графики потерь и разубоживания представлены на рисунках 6 и 7.

Математическая обработка данных физического моделирования выпуска отбитой рудной массы при погашении МЭЦ позволила установить зависимости потерь и разубоживания руды от мощности рудного тела (рис. 8 и 9).

Как видно из рисунка 8, минимальные потери руды в процессе всего выпуска наблюдаются при мощности рудного тела 10 м. С увеличением мощности потери возрастают. При одинаковом объеме добытой рудной массы 7 тыс. т потери равны 17 и 42 %, соответственно при мощности рудного тела 10 и 15 м.

В начале выпуска происходит добыча чистой руды. Затем, как видно из графиков (рис. 9), разубоживание при меньшей мощности рудного тела повсеместно выше, чем при большей мощности. Например, при одинаковом объеме добычи

7 тыс. т, разубоживание равно 40 и 32 % соответственно при мощности рудного тела 10 и 15 м.

Таблица 1 / Table 1

Данные по выпуску рудной массы в процессе моделирования при мощности залежи 15 м /
Data on the release of ore drawing the simulation process at an ore body capacity of 15 m

№ ковша	Рудная масса с нарастающим итогом, г	Порода, г	Руда, г	Разубоживание, %	Потери, %
1-120	1307,7	0	1307,7	0,00	84,26
121-180	1939,5	55,78	1883,72	2,88	77,32
181-240	2588,98	179,4	2409,58	6,93	70,99
241-300	3236,24	434,07	2802,17	13,41	66,26
301-360	3872,56	678,04	3194,52	17,51	61,54
361-420	4513,76	951,09	3562,67	21,07	57,11
421-480	5169,11	1305,71	3863,4	25,26	53,49
481-540	5815,83	1782,75	4033,08	30,65	51,44
541-600	6444,01	2182,1	4261,91	33,86	48,69
601-660	7098,7	2598,52	4500,18	36,61	45,82
661-732	7879,53	3170,45	4709,08	40,24	43,31

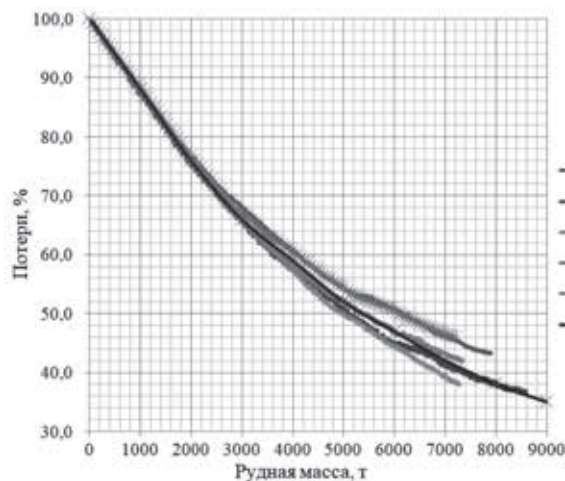


Рис. 6. Сводные графики изменения потерь в зависимости от количества добытой рудной массы при $m_p = 15$ м /
Fig. 6. Summary graphs of loss changes depending on the amount of ore mass extracted at $m_p = 15$ m

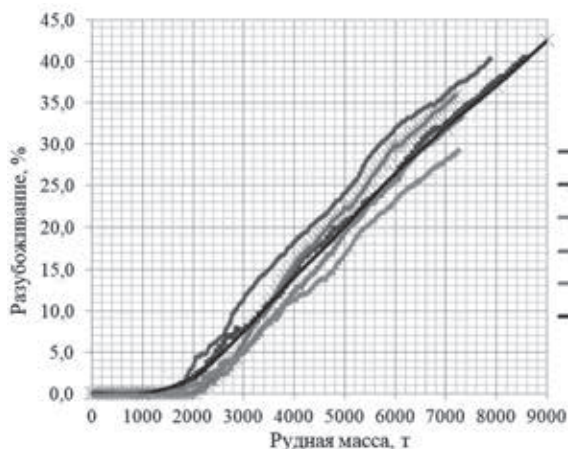


Рис. 7. Сводные графики изменения разубоживания в зависимости от количества добытой рудной массы при $m_p = 15$ м /
Fig. 7. Summary graphs of the dilution values change depending on the amount of ore mass extracted at $m_p = 15$ m

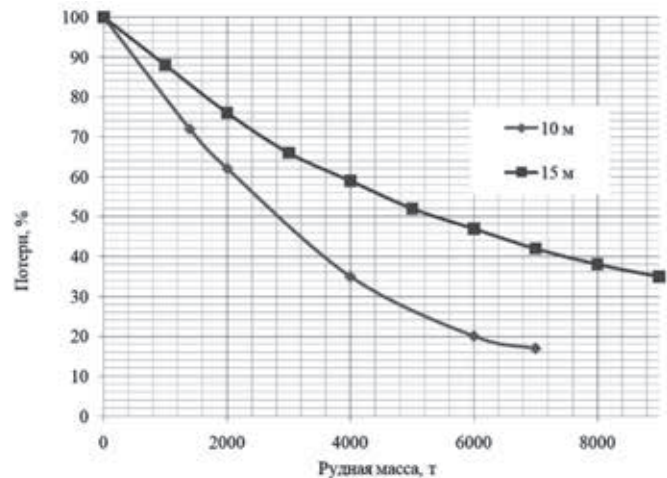


Рис. 8. Зависимости потерь отбитой руды от мощности рудного тела и объема добычи /
Fig. 8. The dependence of the losses of the beaten ore on the capacity of the ore body and the volume of production

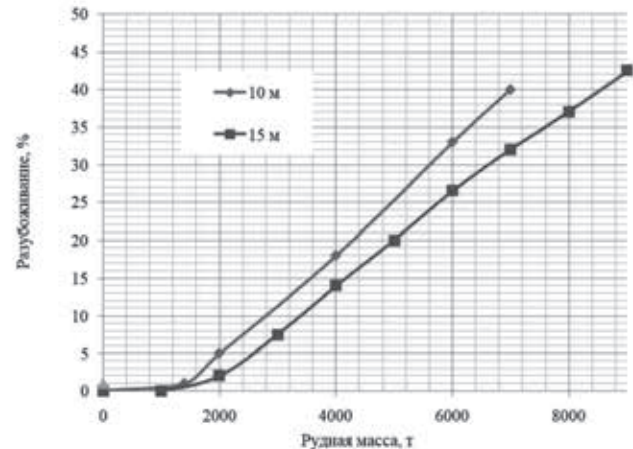


Рис. 9. Зависимость разубоживания руды от мощности рудного тела и объема добычи /
Fig. 9. Dependence of ore dilution on the ore body capacity and production volume

Для установления зависимостей величин потерь и разубоживания для всего спектра горно-геологических условий, характерных для рудника, было проведено экономико-математическое моделирование.

Для экономико-математического моделирования выпуска руды, разрушенного массовым взрывом междуэтажного целика, разработана 3D-модель выпуска рудной массы в среде AutoCad (рис. 10).

В 3D-модели имеется два тела, имитирующих обрушенную руду и вмещающий необрушенный массив. Выработанное пространство в модели не заполняется, так как пустота имитирует обрушенную породу.

Процесс моделирования в среде AutoCad заключается в следующем:

В 3D-модели указываются массив, руда и начальная точка выпуска.

Устанавливаются начальная высота и шаг прироста высоты фигуры выпуска, задаются ширина выпускного отверстия и глубина забора руды.

3. В автоматическом режиме с использованием разработанной авторами LISP-программы осуществляется:

– построение фигуры выпуска заданной высоты;

- обрезка фигуры выпуска массивом и вычисление объема фигуры выпуска;
- вычитание фигуры выпуска из 3D-объекта, имитирующего руду и определение оставшегося объема руды.

Особенностью процесса моделирования при выпуске МЭЦ является то, что выпуск осуществляется не из одного, а равномерно-последовательно из всех выпускных отверстий (рис. 11).

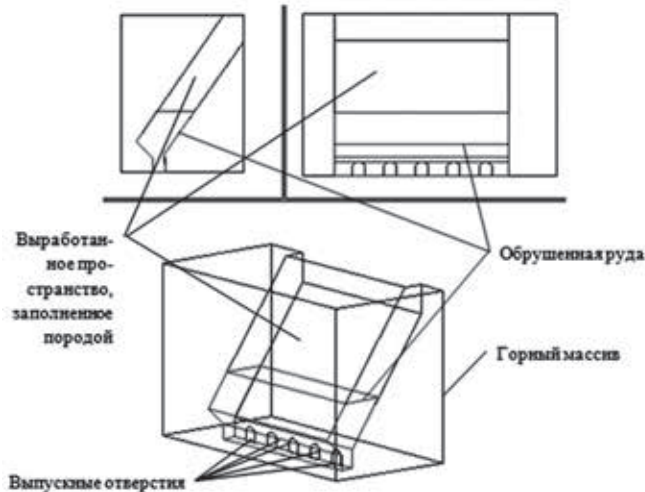


Рис. 10. 3D-модель отбитой руды и выработанного пространства / Fig. 10. 3D model of the beaten ore and the worked-out space

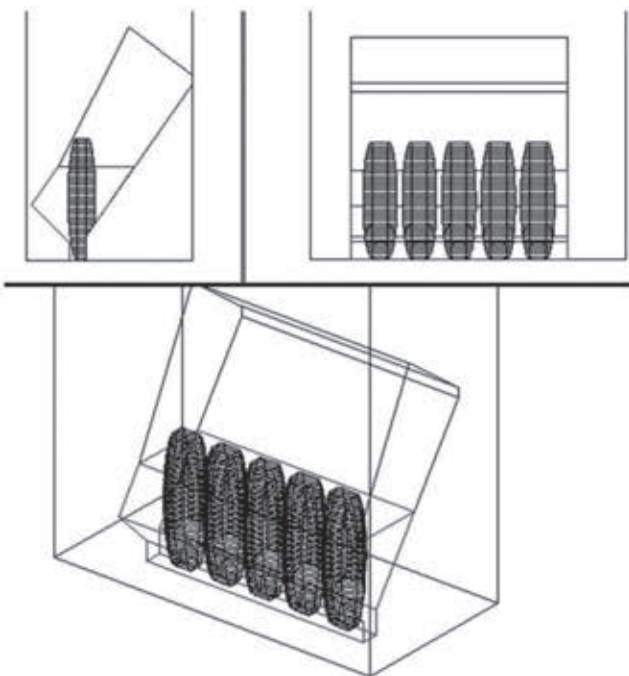


Рис. 11. 3D-модель формирования фигур дозы выпуска руды / Fig. 11. 3D model of shaping the ore drawing dose

Проведенное согласно матрице (табл. 2) математическое моделирование процесса выпуска рудной массы позволило установить зависимости формирования величин потерь и разубоживания от величины выпущенной горной массы при различных параметрах рудных тел и условий их залегания.

Примеры результатов моделирования для угла падения залежи 55° при различных мощностях рудного тела представлены на графиках (рис. 12 и 13).

Таблица 2 / Table 2

Матрица вариантов моделирования отработки запасов междупланного целика / Matrix of options for modeling the development of stocks of the inter-floor pillars

Мощность рудного тела, м	Толщина МЭЦ, м				
	Угол падения рудного тела, град.				
	40	45	50	55	60
5	8	8	8,5	9	9
10	11	11	13	11	10
15	15	15	15	11	11

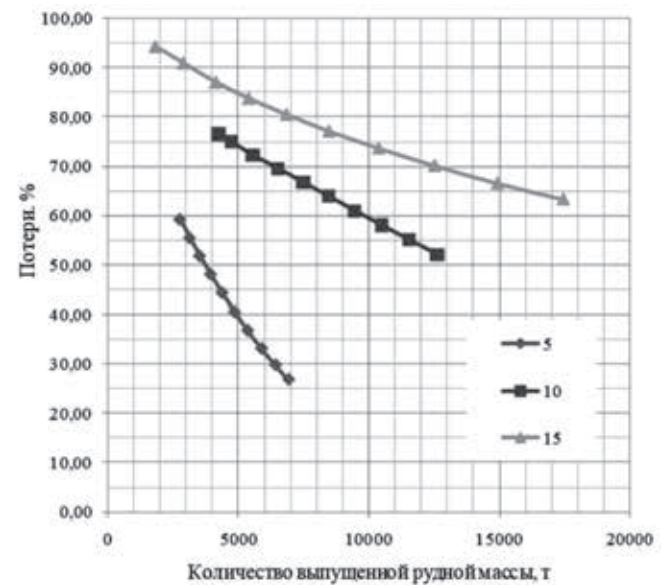


Рис. 12. Графики зависимости величины потерь от количества выпущенной горной массы при различной мощности залежи. Угол падения залежи 55° / Fig. 12. Graphs of the dependence of the amount of losses on the amount of released rock mass at different reservoir capacities. The angle of incidence of the deposit is 55°

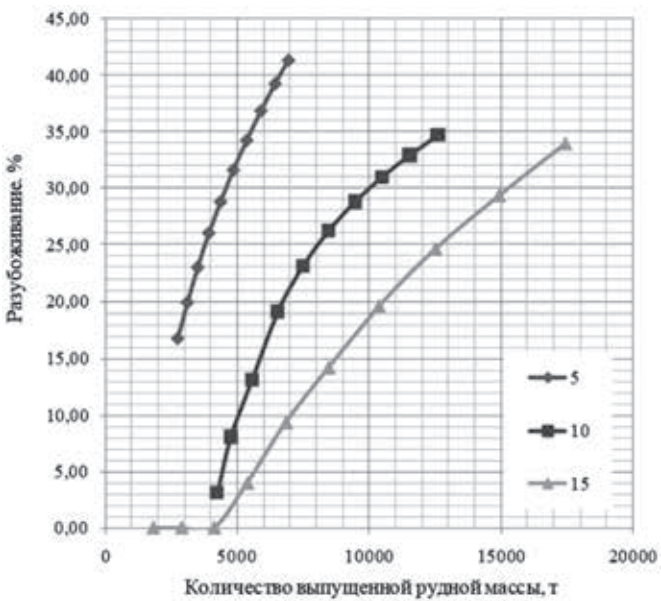


Рис. 13. Графики зависимости величины разубоживания от количества выпущенной горной массы при различной мощности залежи. Угол падения залежи 55° / Fig. 13. Graphs of the dependence of the amount of ore dilution on the amount of released rock mass at different reservoir capacities. The angle of incidence of the deposit is 55°

Заключение

1. В процессе исследований выяснилось следующее:
 - минимальные потери руды в процессе всего выпуска при погашении МЭЦ наблюдаются при мощности рудного тела 10 м. С увеличением мощности потери возрастают. При одинаковом объеме добытой рудной массы 7 тыс. т потери равны 17 и 42 % соответственно при мощности рудного тела 10 и 15 м;
 - в начале выпуска происходит добыча чистой руды, затем разубоживание при меньшей мощности рудного тела повсеместно выше, чем при большей мощности. Например, при одинаковом объеме добычи 7 тыс. т разубоживание равно 40 и 32 % соответственно при мощности рудного тела 10 и 15 м;
 - математическое моделирование процесса выпуска рудной массы МЭЦ позволило установить зависимости формирования величин потерь и разубоживания от величины выпу-

щенной горной массы при различных параметрах рудных тел и условий их залегания.

Выводы

1. В статье рассматривается физико-математическое моделирование выпуска руды под обрушенными породами при отработке междуэтажных целиков для камерных систем разработки с этажной и подэтажной выемкой запасов.
2. Приведены результаты исследований, связанные с обоснованием уровня потерь и разубоживания при погашении МЭЦ.
3. Полученные результаты исследований были использованы для обоснования рационального уровня показателей полноты и качества извлечения запасов междуэтажных целиков при этажной-камерных системах разработки и подэтажных штреков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Именитов ВР, Ковалев ИА, Уралов ВС. Моделирование обрушения и выпуска руды. Москва, 1961: 151. [Imenitov VR, Kovalev IA, Uralov VS. Modeling of collapse and ore drawing. Moscow, 1961:151 (In Russ.)]
2. Дубынин НГ. Выпуск руды при подземной разработке. Москва, 1965: 267. [Dubynin NG. Ore drawing during underground mining. Moscow, 1965: 267 (In Russ.)]
3. Малахов ГМ, Безух РВ, Петренко ПД. Теория и практика выпуска руды. Москва, 1968: 311. [Malakhov GM, Bezukh RV, Petrenko PD. Theory and practice of ore drawing. Moscow, 1968: 311 (In Russ.)]
4. Мартынов ВК, Кудрявцев МС, Заец НМ и др. К вопросу о переносе результатов моделирования выпуска руды на натуру. *Разработка рудных месторождений*. 1970;14:13-7. [Martynov VK, Kudryavtsev MS, Zayats NM, et al. On the issue of transferring the results of modeling ore production to nature. *Development of ore deposits*. 1970;14:13-7 (In Russ.)]
5. Just GD, Free GD. The gravity flow of material in the sublevel caving mining system. *Proceedings of the 1st Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*. Melbourne, Institution of Engineers, Australia. Sydney, 1971:88-97.
6. Хартович ЮИ. О закономерностях истечения руды при использовании сил гравитации. *Горный журнал*. 1971;10:26-9. [Khartovich YuI. On the patterns of ore outflow when using gravitational forces. *Mining Journal*. 1971;10:26-9 (In Russ.)]
7. Just GD, Free GD, Bishop GA. Optimation of ring burden in sublevel caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1973;10:119-31.
8. Куликов ВВ. Выпуск руды. Москва, 1980: 303. [Kulikov VV. Ore drawing. Moscow, 1980: 303 (In Russ.)]
9. Peters DC. Physical modeling of the draw behavior of broken rock in caving. *Quarterly of the Colorado School of Mines*. 1984;79(1).
10. Rustan A. Gravity flow of broken rock – what is known and un-known. *Proceedings Mass Min*. Brisbane, 2000: 557-67.
11. Чурсин СМ. Изучение закономерностей истечения руды на базе моделирования на ЭВМ. *Тезисы докладов региональной научно-методологической конференции*. Каратау, 1991: 158. [Chursin SM. Studying the patterns of ore release based on computer modeling. *Abstracts of the regional scientific and methodological conference*. Karatau, 1991: 158 (In Russ.)]
12. Power GR. Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modeling and full scale experiments. Brisbane, 2004.
13. Фрейдин АМ, Неверов АА, Неверов СА и др. Современные способы разработки рудных залежей с обрушением на больших глубинах. Новосибирск, 2008: 151. [Freidin AM, Neverov AA, Neverov SA, et al. Modern methods of mining ore deposits with collapse at great depths. Novosibirsk, 2008:151 (In Russ.)]
14. Калиниченко ВА. Определение доминирующих зависимостей параметров и фигур выпуска разноуплотненной руды на моделях из эквивалентных материалов. *Вестник КТУ*. 2010;26:49-52. [Kalinichenko VA. Determination of the dominant dependencies of the parameters and figures of the output of heterogeneous ore on models made of equivalent materials. *Bulletin of KTU*. 2010;26:49-52 (In Russ.)]
15. Малиновский ЕГ, Ахпасhev БА, Голованов АИ. Сравнение результатов физического моделирования и натурного эксперимента по торцевому выпуску руды при системе этажного принудительного обрушения для пологих залежей. *Известия вузов. Горный журнал*. 2019;7:34-4. [Malinovskij EG, Akhpashev BA, Golovanov AI, et al. Comparison of the results of physical modeling and a full-scale experiment on the face release of ore with a system of floor forced collapse for shallow deposits. *Minerals and Mining Engineering*. 2019;7:34-4 (In Russ.)]
16. Ахпасhev БА, Голованов АИ, Малиновский ЕГ. Обоснование рациональной технологии разработки пологих и наклонных месторождений системами с обрушением руды и пород. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023;2(128). [Akhpashev BA, Golovanov AI, Malinovskij EG. Substantiation of rational technology for the development of shallow and inclined deposits by mining systems with collapse of ore and rocks. *International Scientific Research Journal*. 2023;2(128)] DOI: 10.23670/IRJ.2023.128.71.
17. Малиновский ЕГ, Голованов АИ, Ахпасhev БА. Исследование влияния гранулометрического состава отбитой рудной массы на показатели извлечения при системе этажного обрушения руды физическим моделированием. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2022;3:41-53. [Malinovskij EG, Golovanov AI, Akhpashev BA. Investigation of the influence of the granulometric composition of the chipped ore mass on the recovery rates in the case of a system of floor collapse of ore by physical modeling. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022;3:41-53 (In Russ.)]. DOI: 10.26730/1999-4125-2022-3-41-53.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Богдан Андреевич Ахпашев –

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры подземной разработки месторождений, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: bg1967@ya.ru

Алексей Иванович Голованов –

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры подземной разработки месторождений, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: agolovanov1958@yandex.ru

Игорь Иванович Демченко –

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: demtchenkoii@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Bogdan A. Akhpashev –

Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Underground mining, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: bg1967@ya.ru

Alexey I. Golovanov –

Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Underground mining, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: agolovanov1958@yandex.ru

Igor I. Demchenko –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department Mining Machines and Complexes, Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: demtchenkoii@yandex.ru

Критерии авторства / Contribution:

Б. А. Ахпашев – создание экономико-математической модели, проведение экономико-математического моделирования, обоснование нормативных величин потерь и разубоживания; А. И. Голованов – создание физической модели, проведение физического моделирования, обработка и анализ результатов физического моделирования; И. И. Демченко – участие в проведении физического моделирования, анализ результатов физического и экономико-математического моделирования. / B. A. Akhpashev – creation of an economic and mathematical model, conducting economic and mathematical modeling, justification of the standard values of losses and dilution; A. I. Golovanov – creating a physical model, conducting physical modeling, processing and analyzing the results of physical modeling; I. I. Demchenko – participation in physical modeling, analysis of the results of physical and economic-mathematical modeling.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 14.01.2025.

Поступила после рецензирования: 23.03.2025.

Принята к публикации: 29.03.2025.

Article info

Received: 14.01.2025.

Revised: 23.03.2025.

Accepted: 29.03.2025.