

На правах рукописи



Лаптев Владимир Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ И
РАЗУБОЖИВАНИЯ РУДЫ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ТОРЦЕВОГО ВЫПУСКА**

Специальность 2.8.8.

Геотехнология, горные машины

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Апатиты – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук».

Научный руководитель

Лукичёв Сергей Вячеславович, доктор технических наук

Официальные оппоненты:

Неверов Сергей Алексеевич, доктор технических наук,
заведующий лабораторией подземной разработки рудных месторождений
Института горного дела СО РАН;

Стародубов Алексей Николаевич, кандидат технических наук,
заместитель директора по научной работе Института угля ФИЦ УУХ СО РАН.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН).

Защита диссертации состоится 28 ноября 2023 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfr.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

При ведении подземных горных работ наибольшей производительностью отличаются системы разработки месторождений полезных ископаемых с обрушением руды и вмещающих пород. На экономическую эффективность этих систем значительное влияние оказывает процесс выпуска отбитой руды из очистных блоков. В системе разработки с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды, имеющей на сегодняшний день наиболее широкое применение среди систем с обрушением, более 70% потерь руды приходится на эксплуатационные потери при выпуске. Поэтому от организации данного процесса значительно зависят качество и полнота извлечения полезного ископаемого из недр – важнейшие технико-экономические показатели системы разработки. В условиях снижения качества извлекаемых руд и общего истощения запасов разведанных месторождений вопросы извлечения полезных ископаемых с минимально возможными количественными и качественными потерями приобретают всё большую актуальность как для предприятий, обрабатывающих месторождения, так и для государства в целом.

Исследованию механизма формирования и методик прогнозирования потерь и разубоживания руды при выпуске посвящено значительное количество трудов отечественных и зарубежных учёных. Ими был проведён ряд исследований процесса выпуска руды, на основе которых определены оптимальные параметры конструктивных элементов системы разработки для различных горно-геологических и горнотехнических условий, разработаны методики определения и нормирования показателей извлечений, разработаны технологии по управлению качеством добываемой горной массы (ГМ) и формирования транспортной системы грузопотоков. Разработанные методики легли в основу расчётных методов, практика применения которых показала, что результаты расчётов могут значительно расходиться с фактическими значениями.

Одной из основных причин этого является сложность изучения поведения сыпучего материала, представленного горной массой неоднородного гранулометрического состава (ГС) в условиях очистных блоков. На поведение сыпучего материала при его выпуске оказывает влияние ряд факторов, связанных с его физико-механическими и другими свойствами, влияющими на его сыпучесть, а также условия, в которых протекает выпуск. Рассмотрение каждого фактора в отдельности даёт общее понимание его влияния на конечные результаты. Однако необходимо учитывать и их совместное воздействие, где каждый фактор, вступая во взаимосвязь с другими, может проявлять себя иначе по сравнению с его изолированным влиянием на процесс.

Исследования процесса выпуска руды, проводимые в основном на физических моделях, из-за ограниченных возможностей последних не позволяют в полной мере изучить механизм процесса выпуска для формирования комплексного представления о процессах, происходящих внутри разрушенного массива горных пород. Данное обстоятельство показывает необходимость проведения исследований с использованием методов, позволяющих детально отслеживать движение раздробленной ГМ применительно к различным технологическим схемам выпуска.

Среди таких методов можно выделить метод дискретных элементов, предназначенный для моделирования поведения сыпучих материалов.

Возможность использования современных методов моделирования для изучения поведения ГМ создаёт необходимую инструментальную базу для исследований и оптимизации параметров конструктивных элементов системы разработки и режимов выпуска руды.

Объектом исследования является процесс торцевого выпуска ГМ в системе разработки с подэтажным обрушением руды и вмещающих пород, предметом исследования – закономерности истечения раздробленной ГМ и механизмы формирования потерь и разубоживания при торцевом выпуске.

Степень разработанности проблемы

Исследованиям выпуска руды посвящено значительное количество трудов отечественных и зарубежных учёных. основополагающими являются работы Агошкова М.И., Аминова В.Н., Балхавдарова Х.А., Барона Л.И., Демидова Ю.В., Дубынина Н.Г., Ермаковой И.А., Именитова В.Р., Иофина С.Л., Куликова В.В., Малахова Г.М., Минаева С.И., Неверова С.А., Пепелева Р.Г., Савича И.Н., Стажевского С.Б., Шкарпетина В.В., Cleary P.W., Kvapil R., Laubscher D.H., и мн. др.

Проведённый анализ литературных источников показал, что в настоящее время, несмотря на более чем 80-летнюю историю исследований, до сих пор нет единого мнения об отдельных ключевых особенностях поведения раздробленной ГМ при её выпуске, в частности: о форме фигуры выпуска, о траекториях перемещения фрагментов сыпучей среды при торцевом и донном выпуске, о совокупном влиянии параметров выпуска на показатели извлечения.

Анализ публикаций показал, что наиболее распространённым на сегодня методом исследования процесса выпуска руды является его физическое и численное моделирование. При этом физическое моделирование за более чем 80-ти летний опыт применения исчерпало свои исследовательские возможности. Одновременно инструменты цифрового моделирования выпуска руды, разработанные на основе положений теории выпуска, позволяют с приемлемой для производственных целей достоверностью воспроизвести условия, процесс и результат выпуска ГМ, однако слабо применимы для исследовательских целей. Для получения наиболее достоверных результатов необходимо применять более совершенные виды моделирования поведения раздробленной ГМ, основанные на цифровом подобию реального механизма взаимодействия кусков различной формы и размера в процессе их перемещения.

Цель работы заключается в разработке методики имитационного моделирования торцевого выпуска руды для оценки потерь и разубоживания в системах разработки с подэтажным обрушением руды и вмещающих пород.

Идея работы заключается в использовании метода дискретных элементов для исследования закономерностей истечения руды из очистных блоков, формирующих типовые технологические схемы выпуска.

Задачи исследования:

- 1) Сформулировать требования к численной модели, выполнить её настройку и проверку.
- 2) Провести серию численных экспериментов для установления общих закономерностей движения фрагментов моделируемой среды при различных начальных и граничных условиях.

3) Провести численные исследования процесса торцевого выпуска руды на примере горнотехнических условий разработки апатитовых руд Хибинских месторождений для выявления закономерностей процесса истечения руды.

4) На основе выявленных закономерностей разработать методику обоснования оптимальных параметров системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды.

Научная новизна заключается в применении метода дискретных элементов для изучения закономерностей движения кусков раздробленной ГМ разнородного грансостава к выпускному отверстию на полномасштабных моделях очистных блоков, формирующих типовые технологические схемы выпуска и обоснованию соответствия траектории движения кусков графику кубической функции.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: надежностью исходных данных, полученных из разных источников, а также сходимостью полученных при моделировании результатов с основными положениями теории выпуска руды и с практическими данными действующих рудников; в том числе, с экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях.

Научное значение работы заключается в выявлении новых закономерностей перемещения кусков отбитой ГМ в процессе выпуска руды, полученных в результате численного имитационного моделирования.

Практическое значение работы заключается в разработке:

- численной имитационной модели торцевого выпуска ГМ в системе разработки с подэтажным обрушением;
- методики нормирования и планирования показателей извлечения руды при разработке хибинских апатит-нефелиновых месторождений;
- практических рекомендаций по проектированию конструктивных элементов системы разработки с целью повышения полноты и качества извлечения руды;
- в разработке рациональных планов выпуска руды из очистного пространства.

Апробация работы. Результаты работы были использованы в разработке методики прогнозирования и нормирования показателей извлечения в Инструкции по учёту состояния и движения запасов, определению, планированию и нормированию количественных и качественных потерь апатит-нефелиновых руд на рудниках КФ «АО Апатит». Результаты исследований докладывались на 6 научно-практических конференциях.

Публикации. По результатам исследований было опубликовано 5 научных статей в отечественных изданиях, 2 из которых входят в перечень рекомендованных ВАК; также материалы исследований вошли в раздел опубликованной монографии. Общее количество работ, опубликованных автором – 11 (в том числе 8 - в изданиях, рекомендованных ВАК, из которых 4 работы в научных изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science), а также автор имеет 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Работа изложена на 128 страницах и состоит из Введения, четырёх глав, каждая из которых заканчивается выводами по главе, заключения и списка литературы на 93 источника. Работа содержит 20 таблиц и 55 рисунков.

Автор выражает благодарность за помощь в проведении исследований, подготовке материалов, поддержку и идейное сопровождение:

- научному руководителю д.т.н. Лукичёву С.В.;

- коллективу лаборатории «Теории комплексного освоения и сохранения недр» Горного института КНЦ РАН во главе с д.т.н. Наговицыным О.В.

Отдельная благодарность выражается

- н.с. лаборатории Теории комплексного освоения и сохранения недр Горного института КНЦ РАН Белгородцеву О.В. за помощь в постановке численных экспериментов и интерпретации их результатов, а также за предоставление методических материалов по нормированию и планированию показателей извлечения руды из недр;
- представителям маркшейдерской службы КФ «АО Апатит» Белоусову В.В. и Николаеву Р.В. за предоставление исходных данных и консультирование при проведении экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование метода дискретных элементов обеспечивает адекватное имитационное моделирование процесса выпуска раздробленной ГМ при исследовании различных технологических схем. Подбор характеристик модели позволяет не только обеспечить её соответствие реальной среде, но и многократно снизить время вычислительного эксперимента.

Для проведения исследований в качестве метода моделирования был выбран метод дискретных элементов (МДЭ), хорошо зарекомендовавший себя в задачах, связанных с моделированием сыпучих сред. В МДЭ, реализованном в Rocky DEM, используются следующие модели расчёта: гистерезисной линейной пружины, жидкого моста, контактной жесткости, скольжения, склеивания, демпфированные упругие модели, линейная (Cundall) контактная модель, контактная модель Герца-Миндлина и Дересевича и ее вариантов, а также различные сочетания данных моделей. Система уравнений движения для каждой частицы при МДЭ может быть описана:

$$\begin{cases} m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i b + \sum F_i \\ I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum (T_c + M_r) \end{cases} \quad (1)$$

где, t – время, с; m_i – масса частицы, кг; I_i – момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$. Вектор F_i определяется как сумма сил, действующих на контактах i -й и j -й частиц (включая силу тяжести):

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij} + m_i g, H \quad (2)$$

Вектор M_i возникает как момент сил F_{ij} относительно центра i -й частицы:

$$M_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N M_{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^N (x_i - x_j) F_{ij}, H \cdot \text{м} \quad (3)$$

Поверхностные силы F_{ij} состоят из сил трения $F_{t,ij}$ и отталкивания $F_{n,ij}$. Для их определения используются различные контактные модели соударения. Сила отталкивания возникает между частицами при условии $\delta_{ij} > 0$ и направлена по нормали n_{ij} в направлении центра i -й частицы. Для ее определения используется вязкоупругую модель соударения:

$$F_{n,ij} = F_{n,ij}^e + F_{n,ij}^v \quad (4)$$

$F_{n,ij}^e$ – упругая составляющая, Н; $F_{n,ij}^v$ – вязкая составляющая, Н.

Упругая часть силы в соответствии Дж. Герцу

$$F_{n,ij}^e = \frac{4}{3} \frac{E_i E_j}{(1-\nu_i^2)E_j + (1-\nu_j^2)E_i} \sqrt{\frac{R_i R_j}{R_i + R_j}} \delta_{ij}^{3/2} \quad (5)$$

где ν_i – коэффициент Пуассона, E_i – модуль упругости частицы, ρ_a , δ_{ij} – величина перекрытия частиц, м.

Вязкая составляющая силы отталкивания определяется:

$$F_{n,ij}^v = \gamma_n M_{ij} u_{n,ij}, \quad (6)$$

где M_{ij} – приведенная масса частиц, кг; $u_{n,ij}$ – проекция относительной скорости точки соударения на ось n_{ij} , м/с; γ_n – коэффициент демпфирования, оказывающий основное влияние на коэффициент восстановления скорости после удара.

Сила трения $F_{t,ij}$ направлена против движения i -й частицы относительно j -й, а ее величина определяется:

$$F_{t,ij} = -\text{sign}(u_{t,ij}) F_{n,ij} \tan \varphi_i, \quad (7)$$

где $u_{t,ij}$ – проекция скорости точки контакта C_i относительно скорости точки C_j на ось t_{ij} , м/с; φ_i – угол контактного трения между частицами, рад.

Согласно опубликованным работам, а также проведенным автором тестовых экспериментам по численному моделированию выпуска руды из бункеров, было установлено, что МДЭ, обладает хорошими адаптационными возможностями и исследовательским инструментарием. При этом, его важным преимуществом является возможность создания максимально идентичных начальных и граничных условий в модели при исследовании влияния на процесс отдельных факторов. Однако значительным препятствием при использовании МДЭ является его вычислительная сложность.

Условием, необходимым для получения достоверных результатов исследований на численной модели, реализующей МДЭ, является точность настройки применяемых физических моделей расчёта и в частности - характеристик материала. Для калибровки модели рядом численных и натуральных экспериментов были определены характеристики моделируемой ГМ. Численная модель была заверена по углу естественного откоса материала при его высыпании на плоскость, а также по физическому подобию поведения материала в модели и в натуре.

Из анализа работ различных авторов и проведенного тестового моделирования следует, что на результаты выпуска существенное влияние оказывают форма кусков, гранулометрический состав материала, геометрические параметры модели, физико-механические характеристики сыпучего материала и режим выпуска. Зависимость показателей извлечения и формирующихся потоков кусков ГМ при моделировании согласовались с общепринятыми в теории выпуска положениями и результатами физического моделирования, проведенного другими авторами, что позволило сделать вывод об адекватности численной модели и возможности её использования для изучения процесса выпуска раздробленной ГМ. Главным препятствием для применения этого метода является достаточно длительное время расчёта модели. Реальные технологические ситуации существенно сложнее тестовых моделей, что в качестве одной из задач определило сокращение времени расчёта. Для оптимизации времени расчёта с сохранением точности модели были оптимизированы следующие параметры модели и вычислительные процедуры:

- ограничение области моделирования одним-тремя подэтажами, временное отсечение незадействованных в текущий момент областей перемычками; использование при моделировании сыпучего материала с однородным ГС;
- подбор физических моделей и параметров расчёта, позволяющих ускорить расчёт, но сохраняющих точность модели;

- определение оптимальных временных промежутков между технологическими операциями
- использование вычислительного кластера, поддерживающего возможности распараллеливания вычислений, для проведения расчётов.

Чтобы установить возможность применения однородного ГС взамен разнородного и подобрать средний размер фрагмента, оптимальный с точки зрения корректности модели и времени её расчёта, был проведён ряд экспериментов, исследующих возможность ускорения расчётов модели за счёт перечисленных мероприятий. В результате экспериментов была установлена возможность применения упрощённых физических моделей расчёта, и выявлено, что сыпучий материал с однородным ГС и средним размером фрагмента 0,3 м наиболее точно соответствует поведению сыпучего материала с неоднородным ГС (для рассматриваемых условий).

Результаты заверочного моделирования также показали возможность применения моделей кусков ГМ сферической формы для моделирования выпуска за счёт подбора коэффициентов статического и динамического трения, а также коэффициента сопротивления качению. При этом время расчёта модели со сферической формой фрагментов сократилось в 5 раз по сравнению с однородным ГС несферической формы фрагментов и в 32 раза по сравнению с разнородным ГС несферической формы фрагментов.

Кроме того, экспериментально установлено, что для численного моделирования поведения сыпучего материала при выпуске помимо заправки его свойств по углу естественного откоса и углу обрушения требуется заправка модели по основным особенностям поведения материала в моделируемых условиях. Среди них можно выделить: формируемые фигуры выпуска, отсутствие движения материала в тех областях, где он должен оставаться неподвижным, общая схема истечения материала. Подобранные и заверенные характеристики численной модели представлены в Таблице 1.

Разработанная методика имитационного моделирования представлена в виде блок-схемы (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Принципиальная блок-схема методики имитационного моделирования выпуска руды

Таблица 1. Характеристики численной модели (в терминах Rocky DEM) и свойства сыпучего материала

Параметр	Значение
Модель сил сопротивления качению	Type 3
Модель нормальных сил	Hysteretic Linear Spring

Модель сил адгезии	Constant
Модель тангенциальных сил	Linear Spring Coulomb Model
Сопротивление качению, -	0.3
Коэффициент реституции, -	0.15
Расстояние начала действия сил адгезии, м	0.002
Величина 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

Таким образом, в результате была разработана полномасштабная численная модель торцевого выпуска руды, применительно к условиям Кировского рудника КФ «АО Апатит». Модель обладает следующими критериями подобия:

- подобие геометрических параметров модели и природы;
- подобие протекающих процессов модели и природы, достигающееся за счёт воспроизведения поведения материала в модели, соответствующее данным, полученным в производственных условиях Кировского рудника и согласующихся с существующей теорией выпуска;
- равенство определяющих критериев, входящих в уравнения численной модели и в натуре.

2. Траектории движения кусков ГМ к выпускному отверстию в большей степени соответствуют графику кубической функции, а не квадратичной. По параболической траектории куски стремятся к центральной зоне потока, обладающей наибольшей скоростью движения

Для тестовых экспериментов были разработаны численные модели бункеров, на которых имитировался донный выпуск. Для детальных исследований типовых технологических схем, применяющихся на хибинских апатит-нефелиновых месторождениях, был разработан ряд численных моделей, представляющих собой фрагменты очистных блоков системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Исходя из более чем 30 летнего опыта ведения горных работ данной системой разработки на хибинских месторождениях для численного моделирования рассматривались наиболее характерные параметры конструктивных элементов (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры конструктивных элементов моделей

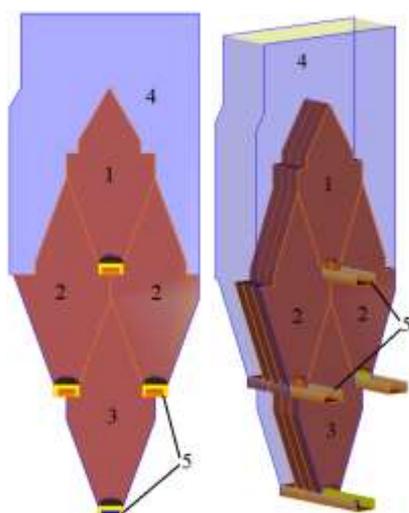
	Угол наклона секции, град.	Угол откоса траншеи, град.	Высота подэтажа, м	Толщина отбиваемого слоя, м
Модель №4	90	80	20	2,8
Модель №5	90	70		
Модель №6	90	60		
Модель №7	85	80		
Модель №8	80	80		

Модели №4-8 представлены одной панелью с тремя последовательно расположенными секциями отбойки, за которыми расположен слой ГМ, имитирующий кусковой материал ранее отработанных секций отбойки. Пространство над секциями отбойки заполнено раздробленной ГМ, имитирующей вмещающие породы. Гранулометрический состав сыпучего материала однородный; размер куса руды 0,3 м, породы – 0,5 м; форма кусков – сферическая. Выпуск из каждой секции продолжался до тех пор, пока в дозе выпуска сохранялось содержание полезного компонента не ниже 4%.

Для исследования особенностей истечения ГМ из нескольких выпускных отверстий при торцевом выпуске были созданы модели №9-10 (таблица 3), разработанные на основе модели №5, поскольку параметры её конструктивных элементов наиболее распространены на подземных рудниках АО «Апатит».

Таблица 3 – Параметры конструктивных элементов моделей №9-10

Наименование	Значение
Угол откоса траншеи, град.	70
Толщина отбиваемого слоя руды, м	2,8
Высота подэтажа, м	25
Расстояние между осями выпускных выработок, м	16
Ширина выработок, м	5,1
Содержание ПК в руде, %	15,0
Содержание ПК в породе, %	1,7



1, 2, 3 – соответственно секции отбойки 1, 2, 3 подэтажа; 4 – вмещающие породы; 5 – выпускные выработки

Рисунок 2 – Модель №9 (№10) - фронтальный вид (слева) и изометрический вид (справа)

Модели №9-10 (Рисунок 2) представляют собой 4 панели, расположенные на трёх подэтажах. Каждая панель содержит 3 секции отбойки (слоя), за которыми расположен слой ГМ, имитирующий кусковой материал ранее отработанных секций отбойки. Модели секций отбойки верхнего подэтажа сверху и вокруг граничат с кусковым материалом, моделирующим породы.

Принято считать, что в случае донного выпуска фрагмент сыпучего материала, попадающий в зону влияния только одного выпускного отверстия, движется к нему по параболической траектории. Инструменты анализа в численной модели позволяют отслеживать траектории движения фрагментов сыпучего материала по результатам расчётов. На представленных моделях производились выборки кусков ГМ по различным параметрам и отслеживались траектории движения. Их анализ показал отличие результатов численных экспериментов от используемых в теории выпуска:

1) В моделях бункеров при донном выпуске фрагменты сыпучего материала, находящиеся в одинаковом положении относительно центра выпускного отверстия (расстояние от него и угол) двигались симметрично относительно оси выпускного отверстия (Рисунок 3). При этом форма траекторий больше похожа на график кубической, а не квадратичной функции. Форма траектории может быть

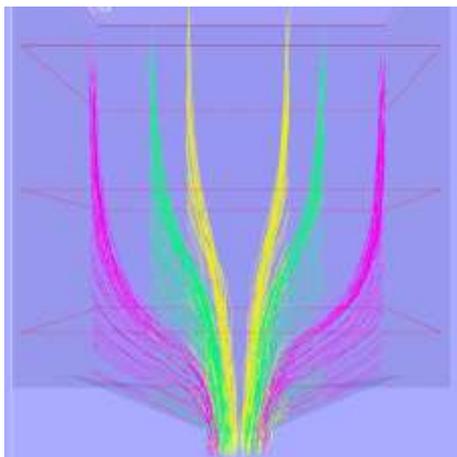


Рисунок 3 – Траектории перемещения фрагментов в зависимости от расстояния до оси выпускного отверстия: жёлтый - 0,35м, зелёный – 0,6м, красный – 1 м траектории движения кусков.

описана квадратичным уравнением только до момента приближения к центральной зоне потока. Если же описывать всю кривую, то необходимо воспользоваться кубическим полиномом. Причём, кривизна траектории зависит от первоначального положения куска, в особенности, от расстояния до оси выпускного отверстия, что при математическом описании отражается в коэффициентах кубического полинома. По графикам траекторий движения отдельных частиц средствами Microsoft Excel были построены линии тренда, описываемые квадратичными и кубическими функциями. Коэффициенты достоверности R^2 для указанных полиномов составили 0,867-0,895 и 0,975-0,986, соответственно, что подтверждает проведённое наблюдение. Таким образом, результаты моделирования дают основание для изменения представления о

2) Полученная гипотеза о траектории движения в условиях донного выпуска была

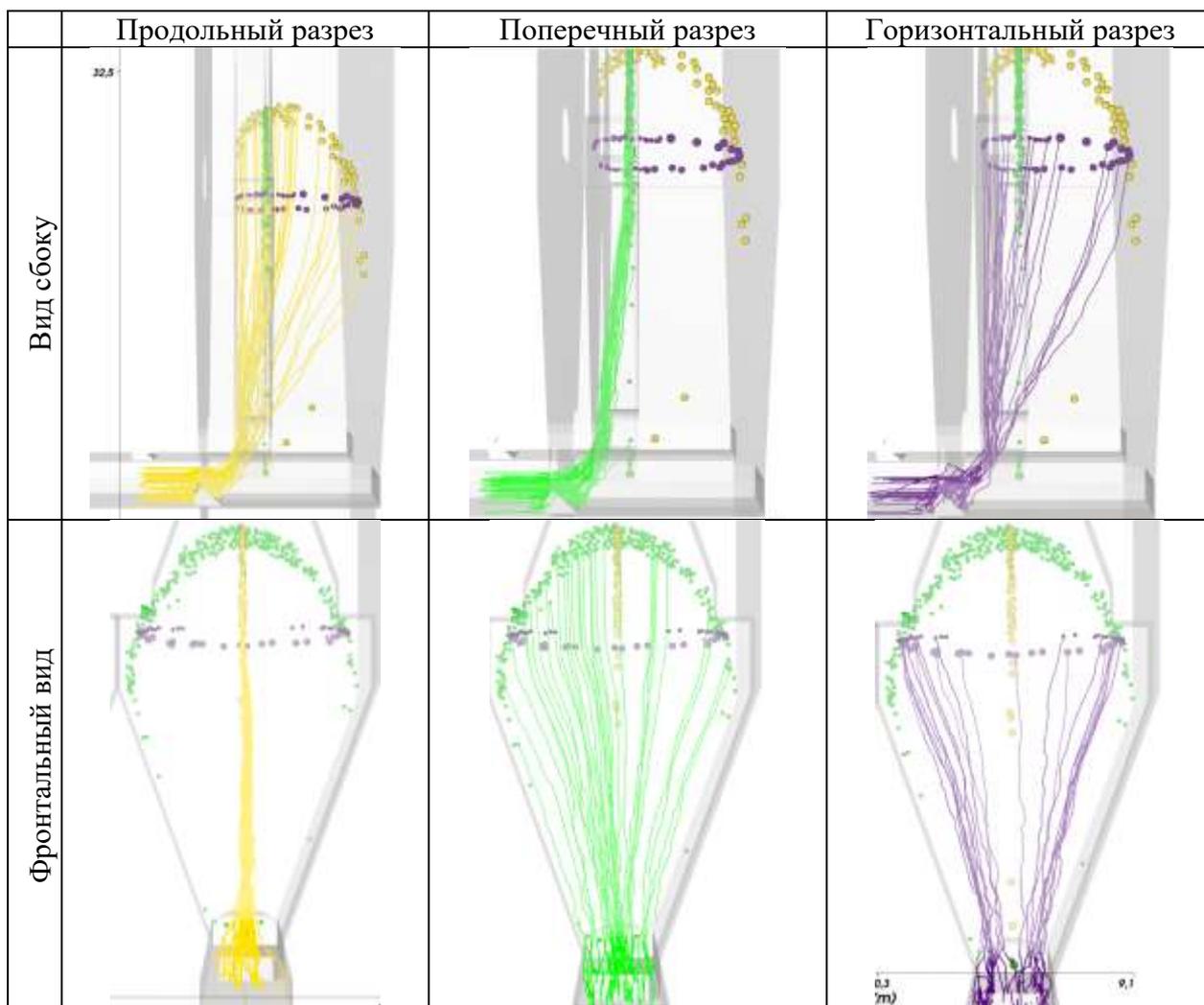


Рисунок 4 – Траектории движения кусков ГМ, находящиеся на поверхности фигуры выпуска в плоскостях разрезов

проверена на моделях с торцевым выпуском. Было проанализировано поведение кусков ГМ, находящихся на поверхности фигуры выпуска слоя 3 подэтажа 2 модели №9. В качестве анализируемых были выбраны куски ГМ, находящиеся на поверхности фигуры выпуска в продольном и поперечном вертикальных разрезах по оси выработки и в горизонтальном разрезе фигуры выпуска. Продольный разрез был сделан по оси выработки, поперечный – по тыльной границе секции отбойки 3, горизонтальный – на высоте 24 м от подошвы выработки.

Отображение траекторий и их последующий анализ показал, что для торцевого выпуска траектории движения кусков к выпускному отверстию также с большей вероятностью описываются кубической функцией, чем квадратичной (Рисунок 4). Коэффициенты достоверности R^2 для указанных полиномов составили 0,963-0,974 и 0,835-0,848 соответственно. Куски ГМ до некоторого момента двигались по параболической траектории, а после попадания в зону с наибольшими скоростями движения, расположенную непосредственно над выпускным отверстием, изменяли траекторию. Кривизна траектории также зависит от начального положения куска ГМ относительно выпускного отверстия, расположенного у козырька выпускной выработки.

3. Минимальные потери при торцевом выпуске апатит – нефелиновой руды достигаются при конструктивных и технологических параметрах системы подэтажного обрушения: угол откоса траншеи 70-80°, расстояние между осями выпускных выработками –16-18 м, фронтальный угол наклона отбиваемой секции – 82-87°.

С начала XXI века добыча балансовых запасов на всех месторождениях апатит-нефелиновых руд производится по системе разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. При этом разработка богатых участков мощных месторождений апатит-нефелиновых руд почти завершена и в настоящее время разрабатываются участки месторождений с более низким содержанием полезного компонента. Кроме того, с понижением горных работ разработка месторождений производится в условиях опасных горными ударами, что требует дополнительных затрат для обеспечения безопасной добычи полезных ископаемых. В сложившихся условиях повышение показателей эффективности технологических процессов очистных работ является актуальной задачей разработки апатит-нефелиновых месторождений.

Для определения рациональных параметров конструктивных элементов в заданных условиях, а также для уточнения влияния параметров на показатели извлечения были разработаны модели №4-8. Процесс моделирования включал следующие стадии имитации:

- 1) Заполнение модели сыпучим материалом.
- 2) Обрушение модели пород в буро-доставочную выработку.
- 3) Имитация отбойки слоя руды и обрушение её в выработку с частичным выбросом руды в сторону обрушенного ранее массива ГП. Таким образом, обеспечивалось геометрическое и физическое подобие процесса выпуска ГМ.
- 4) Выемка рудной массы из забоя черпанием моделью ковша ПДМ. Остановка выемки производилась при падении качества ПК в дозе выпуска ниже бортового.
- 5) Составление и анализ планограммы выпуска рудной массы из секции.
- 6) Подготовка модели к выпуску следующего слоя.
- 7) Повтор шагов 3-5 для следующего слоя.

Для определения влияния углов откоса секции на показатели извлечения сравнивались показатели потерь, разубоживания и среднего качества выпускаемой ГМ.

Габариты фигур выпуска, сформировавшиеся после выпуска ГМ до содержания ниже бортового, и основные показатели извлечения представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Габариты фигур выпуска и основные показатели извлечения

Модель (угол откоса)	Ширина фигуры, м	Высота фигуры, м	Глубина фигуры, м	Объём ГМ в фигуре (без разрыхления), м ³	Потери по модели, %	Потери по текущему слою, %	Разубоживание, %	Среднее содержание ПК в выпущенной ГМ, %
№ 4 (80°)	13,4	38,2	10,2	1515,0	11,0	10,0	66,5	6,2
№ 5 (70°)	18,2	40,8	12,7	2286,0	8,7	6,8	67,3	6,0
№ 6 (60°)	20,0	41,8	12,5	2874,0	23,9	14,5	63,2	6,6

Примечательно, что для моделей №5 и №6 глубина фигуры выпуска одинакова, несмотря на различные углы откоса. При одинаковой глубине фигур выпуска у моделей №5 и №6 можно сделать вывод о том, что фигура развивается на определённую глубину и далее не увеличивается. Разница объёмов достигается за счёт увеличения высоты и выполаживания углов, образующих фигуру.

Объёмы ГМ, выпущенные к моменту остановки выпуска, в каждой модели были различны. Поэтому для сравнения сформировавшихся при различных углах откоса фигур выпуска в моделях №5 и №6 были рассмотрены фигуры выпуска, в которых объём ГМ равен объёму ГМ в фигуре выпуска модели №4. Результаты расчёта представлены в таблице 5, визуальное представление фигур выпуска – на рисунках 5-6.

Таблица 5 – Габариты фигур выпуска после извлечения 1,5 тыс м³ ГМ

Модель (угол откоса)	Ширина фигуры, м	Высота фигуры, м	Глубина фигуры, м
№ 4 (80°)	13,6	38,2	10,2
№ 5 (70°)	16,5	33,9	10,2
№ 6 (60°)	16,0	32,9	9,2

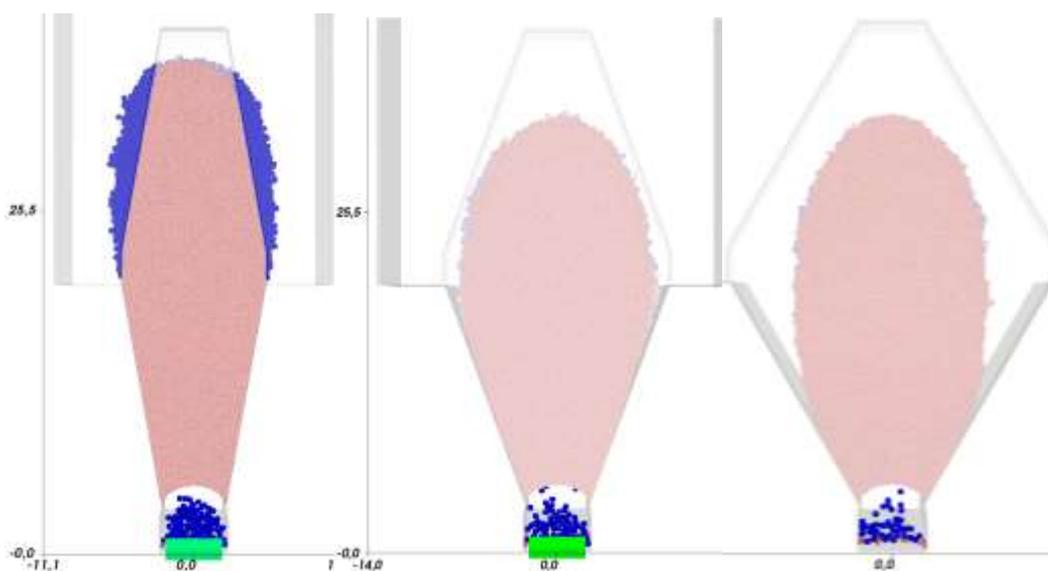


Рисунок 5 – Фигуры выпуска после извлечения 1,5 тыс. м³ ГМ из моделей №4, №5 и №6 (слева направо); вид спереди (красные фрагменты – руда, синие – порода)

Из представленных рисунков и таблиц можно сделать вывод, что фигура выпуска в ограничивающих её условиях (крутые углы откоса) развивается в первую очередь вверх. В более «свободных» условиях (модель №6) фигура выпуска развивается в ширину более активно, не усекаясь стенками откоса траншеи. При этом габариты фигуры меньше по ширине

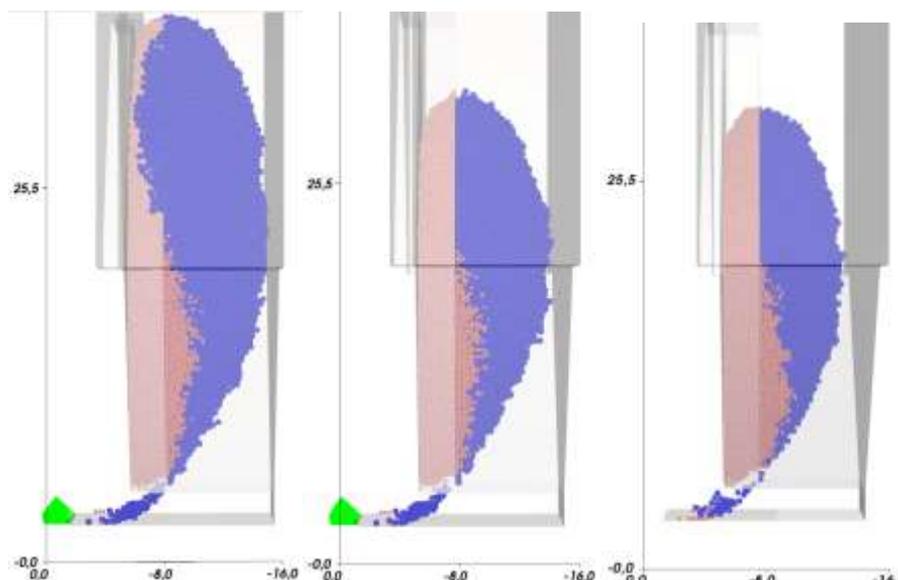


Рисунок 6 – Фигуры выпуска после извлечения 1,5 тыс. м³ ГМ из моделей №4, №5 и №6 (слева направо); вид сбоку (красные фрагменты – руда, синие – порода) и глубине, чем в модели №5 при тех же самых объемах извлечения. Отмечено, что основной объём разубоживающих пород был выпущен из-за задней границей выпускаемого слоя (фронтальное разубоживание). Боковое и верхнее разубоживание присутствовало, но составило куда меньшие объёмы.

При анализе результатов выявлено, что при крутых углах откоса фигура выпуска в плоскости веера почти полностью совпадает с конфигурацией секции отбойки, что сводит потери на откосах траншеи почти к 0. При угле откоса 60° на откосах остаются достаточно объёмные области с неизвлечённой рудой. Таким образом, можно сделать вывод, что относительный объём потерь с выполаживанием угла откоса возрастает.

Наклон секции отбойки относительно вертикальной плоскости задаётся для большего её соответствия геометрии фигуры выпуска. Для изучения влияния «прямого» угла наклона на поведение ГМ при выпуске на основе модели №4, были созданы варианты с углом наклона секции отбойки 85° (модель №7) и 80° (модель №8). Большой наклон секций отбойки трудно осуществим при обурировании вееров скважин.

Показатели извлечения и габариты фигуры выпуска, рассчитанные при извлечении слоя 3 в моделях №4, №7 и №8 представлены в таблице 5.

Таким образом, на основе результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1) Для достижения наиболее оптимальных показателей извлечения следует выбирать углы откоса секции отбойки таким образом, чтобы её ширина максимально совпадала с шириной предполагаемой фигуры выпуска, зависящей от сыпучих свойств ГМ.

2) Глубина внедрения фигуры выпуска слабо зависит от угла откоса траншеи. Однако, по результатам моделирования можно предположить, что меньшее развитие фигуры выпуска в ширину приводит к её меньшему развитию и в глубину. Данное свойство можно объяснить следующим образом: фигура выпуска стремится к форме тела вращения, соответственно, её горизонтальное сечение будет стремиться к форме круга или эллипса. В условиях торцевого выпуска эллипс будет усечён фронтальной стенкой массива ГП. При сохранении соотношения осей эллипса уменьшение его ширины за счёт ограничения со стороны откосов траншеи будет уменьшать глубину фигуры выпуска.

3) Чем круче углы откоса траншеи, тем на большую высоту при одинаковом объёме извлечения разовьётся фигура выпуска. Однако стоит отметить, что более крутые углы откоса увеличивают объёмы проходки ГПР, и не применимы на участках с высоким горным давлением. Экономическую эффективность того или иного варианта технологии необходимо рассматривать в комплексе с выемкой руды из текущей панели, смежных подэтажей и всего блока в целом.

4) Потери руды, остающиеся на фронтальной стенке над выпускным отверстием практически полностью извлекаются при выпуске последующих секций в панели при толщине слоя менее 3,5 м.

5) Наклон секции отбойки в сторону обрушенного массива на 85° относительно горизонтальной плоскости при торцевом выпуске в условиях хибинских месторождений позволяет достичь большего совпадения фигуры выпуска с конфигурацией выпускаемого слоя: уменьшается глубина фигуры выпуска и, как следствие, фронтальное разубоживание; в результате возрастает качество ПК в извлекаемой ГМ.

Таблица 5 – Габариты фигур выпуска и основные показатели извлечения

Модель	Угол наклона секции, град.	Ширина фигуры, м	Высота фигуры, м	Глубина фигуры, м	Объём ГМ в фигуре (без разрыхления), м ³	Потери по модели, %	Потери по текущему слою, %	Разубоживание, %	Среднее содержание ПК в выпущенной ГМ, %
№ 4	90,0	13,4	38,9	10,2	1515,0	11,0	10,0	66,5	6,2
№ 7	85,0	13,6	39,9	9,7	1535,0	7,3	5,0	64,1	6,5
№ 8	80,0	13,3	37,9	9,4	1347,0	12,6	7,9	61,3	6,8

4. При торцевом выпуске руды зона потока внедряется вглубь массива на глубину 0,2-0,3 её высоты, что при толщине выпускаемого слоя 2,6-3,5 м позволяет управлять качеством рудной массы, за счёт выбора момента остановки выпуска в предыдущей секции отбойки.

Для исследования механизма формирования потерь и разубоживания руды использовалась технологическая схема, применяемая на хибинских апатитовых рудниках. И если выше описывались исследования общих закономерностей движения ГМ в границах отдельных секций, то задачей приведённых ниже исследований было воспроизведение с максимально возможной детальностью условий выпуска руды из технологической конструкции, сформированной набором секций и выработок, расположенных на разных подэтажах.

В модели №9 численное моделирование включало в себя стадии, аналогичные стадиям моделей №4-8; после выпуска ГМ из подэтажа 1 подготавливался к моделированию подэтаж 2, снимались перегородки между ними и начинался выпуск подэтажа 2. Аналогично, после выпуска ГМ с подэтажа 2, производился выпуск ГМ из выработки подэтажа 3. Выпуск ГМ из каждого слоя производился до снижения качества ПК ГМ в дозе выпуска ниже 7%.

В модели исследовались фигуры выпуска только для слоя 3. Причём было рассмотрено два варианта режимов выпуска: последовательное извлечение модели ГМ из выработок второго подэтажа и одновременное. В дальнейшем будем называть их модель №9.1 и №9.2 соответственно.

Одной из задач исследования являлось определение объёмов руды, отнесённых к потерям верхнего подэтажа и доизвлекаемых при выемке запасов нижележащих подэтажей. Для этого на моделях №9.1-9.2 производился следующий эксперимент:

1) После выпуска руды из панели 1 подэтажа до показателя качества 7% в каждом слое фиксировалась масса руды, отнесённой к потерям. Состояние сыпучего материала на этот момент сохранялось как исходное для дальнейшего расчёта моделей №9.1 и №9.2.

2) В модели №9.1 моделируется выпуск ГМ из секций отбойки сначала левой панели подэтажа 2, затем правой. В модели №9.2 моделируется выпуск сразу из обеих панелей подэтажа 2. При выпуске руды из слоёв панелей 2 подэтажа помимо общих показателей извлечения отслеживалась абсолютная масса руды, отнесённой к потерям 1 подэтажа, и

определялся коэффициент доизвлечения (отношение извлечённой руды, отнесённой к потерям 1 подэтажа к запасам 1 подэтажа).

3) В обеих моделях по окончании выпуска руды из подэтажа 2 моделировался выпуск руды из подэтажа 3. После выпуска руды 2 подэтажа аналогичным образом определялась абсолютная масса и процент извлечения потерь 1 подэтажа при выпуске руды из слоёв панелей 3 подэтажа.

По результатам эксперимента (Рисунок 7) можно сделать следующие выводы:

1) Основная масса доизвлекаемой руды, отнесённой к потерям верхнего подэтажа, приходится на выпуск слоя 3 в каждой панели. При выпуске слоя 1 потери не доизвлекаются, поскольку во всех моделях в слое 1 объем выпуска ГМ относительно низкий (из-за быстрого внедрения пород из фронтального контакта) и фигура выпуска не успевает развиться на высоту, позволяющую извлекать руду вышележащего подэтажа.

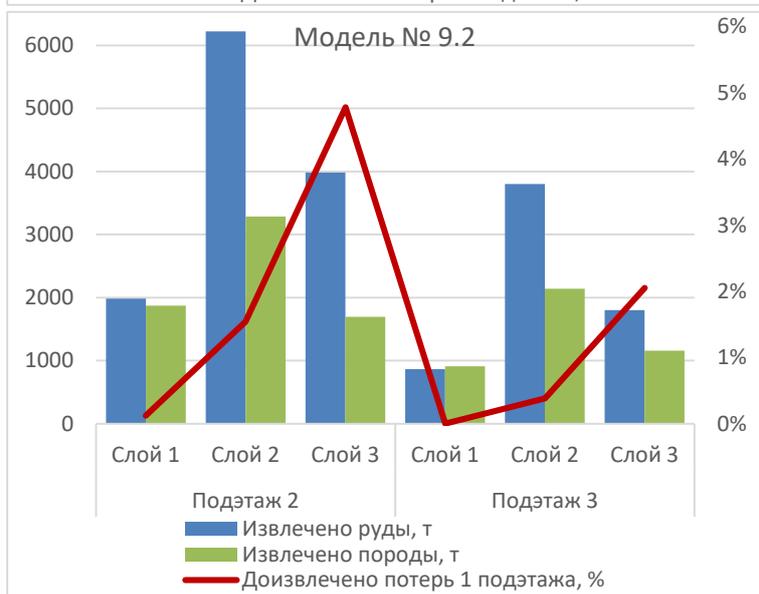
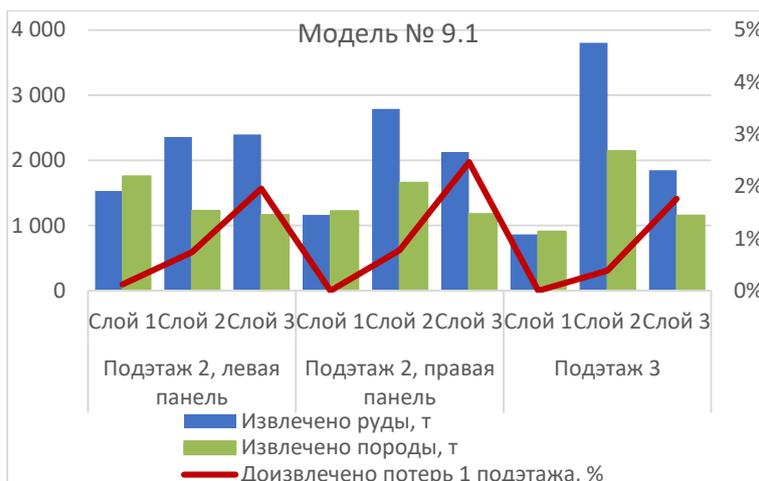


Рисунок 7 – Зависимость доизвлечения потерь 1 подэтажа от объёма извлечения руды и породы в моделях №9.1-9.2

По сути, при выпуске слоя 1 она только приближается к выпускному отверстию текущего подэтажа и будет извлекаться при выпуске следующих слоёв.

2) На подэтаж 2 в моделях №9.1-9.2 было перепушено и извлечено 6,1% и 6,4% руды, отнесённой к потерям подэтажа 1, соответственно. На подэтаж 3 – 2,1% и 2,4 % соответственно. Таким образом, модель с режимом выпуска, в котором производилось одновременное извлечение ГМ из панелей 2 подэтажа показал себя как более эффективный.

3) В обеих моделях на всех подэтажах объём выпущенной ГМ из слоя 2 кратно превышал объёмы выпуска из смежных секций при одинаковом качестве полезного компонента в последней дозе. Среднее качество в выпускаемой ГМ из первых слоёв каждой панели составляло 7-8%, а для слоя 2 и 3 – 10-11%. В слое 1 показатель разубоживания в среднем выше на 15-20% по сравнению со слоями 2 и 3.

По результатам анализа планограмм выпуска моделей №4-8 и №9.1-9.2 была установлена следующая зависимость между объёмами извлечения ГМ из смежных секций отбойки: чем меньше было выпущено ГМ из одной секции до достижения качества полезного компонента в дозе выпуска ниже бортового, тем больший объём и с лучшим средним качеством будет выпускаться из следующей секции до достижения бортового показателя качества ГМ в дозе. Данная закономерность объясняется большим внедрением фигуры выпуска текущей секции в смежные (например, см. таблицы 4-5), что вызывает попадание в неё значительного объёма ГМ, расположенной за границами рабочей секции отбойки. Соответственно, если этот объём представлен породами, то они будут активно разубоживать выпускаемую руду, что приведёт к быстрому падению качества полезного компонента в ГМ и высоким потерям руды по секции вследствие ранней остановки выпуска.

Проиллюстрировать данный механизм можно на модели № 10 (Рисунки 8-9), которая идентична модели №9.2 как по параметрам конструктивных элементов, так и по режиму выпуска. Выпуск на подэтаже 1 в ней вёлся до более низких значений качества, а на подэтажах 2 и 3 – аналогично модели №9 – до 7%. На рис. 5 видно значительное несовпадение фигуры

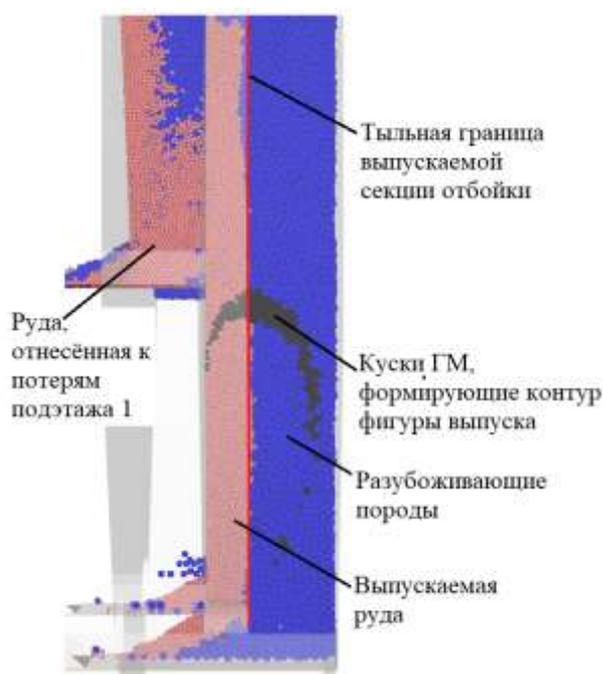


Рисунок 8 – Соотнесение фигуры выпуска и начального положения ГМ на примере слоя 1 подэтажа 2 модели №10 (вертикальный разрез по оси правой выпускной выработки)

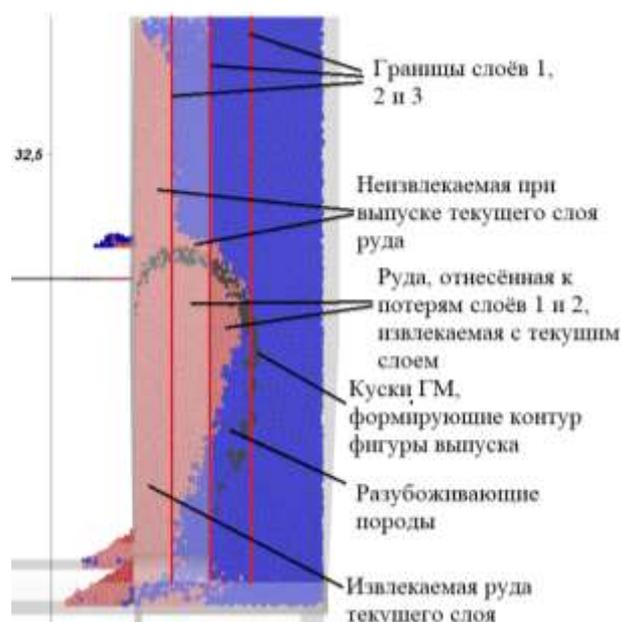


Рисунок 9 – Соотнесение фигуры выпуска и начального положения ГМ на примере слоя 3 подэтажа 2 модели №10 (вертикальный разрез по оси правой выпускной выработки)

выпуска и отбиваемого слоя как по высоте, так и по глубине. В данном случае может напрашиваться вывод о необходимости отбойки и последующей выемки ГМ двух и более секций отбойки одновременно, однако простой геометрический анализ показывает, что в данном случае будут возникать значительно большие потери руды в гребнях на подошве выработки, а также в очистном пространстве.

При наличии за тыльной границей большого количества руды, невыпущенной ранее, она попадает в объём фигуры выпуска и извлекается вместе с выпускаемой секцией (Рисунок 9), где проявилось наилучшее совпадение фигуры выпуска с начальным положением кусков руды. Если продолжать выпуск ГМ из секции, то с каждой дозой разубоживание будет увеличиваться, непропорционально уменьшению потерь. Данная закономерность описана множеством авторов и важна с точки зрения определения момента остановки выпуска. Однако выбор момента остановки выпуска текущей секции отбойки может влиять на экономические показатели не только текущей выемочной единицы, но и управлять показателями извлечения (в первую очередь, средним качеством выпускаемой ГМ) последующих, создавая более благоприятные условия для извлечения руды. Выбор момента остановки выпуска требуется вести, исходя из свойств сыпучести выпускаемого материала, толщины секции отбойки и экономических показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе численного моделирования исследован механизм формирования потери и разубоживания руды при её выпуске из очистных блоков в системах с обрушением руды и вмещающих пород. Для решения задачи моделирования процесса торцевого выпуска ГМ разработана численная модель, в основе которой лежит метод дискретных элементов, реализованный в программе Rocky DEM. С использованием численной модели в режиме имитационного моделирования исследованы технологические схемы выпуска ГМ для типовых на КФ «АО Апатит» горнотехнических условий, в результате чего уточнён ряд параметров, используемых для расчёта показателей потерь и разубоживания руды.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Сформулированы требования к численной модели, имитирующей поведение раздробленной ГМ при её выемке через выпускные отверстия, разработанная на основе требований модель заверена результатами физического моделирования.
2. Разработана методика имитационного моделирования торцевого выпуска руды для оценки показателей потерь и разубоживания.
3. На основе анализа результатов численного моделирования установлено, что траектории движения кусков ГМ к выпускному отверстию в большей степени соответствуют графику кубической функции, а не квадратичной.
4. Показано, что для радикального сокращения времени моделирования выпуска разнородного грансостава можно использовать модель кусков ГМ сферической формы с подбором для моделируемых условий коэффициента сопротивления качению, а также коэффициентов статического и динамического трения. Определены параметры модели, при которых возможно сократить количество моделируемых кусков ГМ, влияющее на время расчёта модели.

5. По результатам численных экспериментов для условий хибинских апатитовых месторождений: определены углы образующей фигуры выпуска (от 64° до 72° в зависимости от угла откоса траншеи); установлен угол рудной «постели» (от 58° до 60° в зависимости от объёмов выпущенной ГМ); определены средние объёмы перепуска руды (суммарно до 9%), отнесённой к потерям верхнего подэтажа очистного блока, на нижние. Это позволяет сделать вывод о слабом влиянии на показатели извлечения схемы одновременного выпуска.

6. Установлено, что при режиме одновременного выпуска секций отбойки нижнего подэтажа показатели доизвлечения руды, отнесённой к потерям верхнего подэтажа, повышаются в среднем на 0,6%.

7. Определены параметры конструктивных элементов, способствующие минимальному показателю потерь при торцевом выпуске апатит-нефелиновой руды, при применении подэтажной системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород: угол откоса траншеи $70-80^{\circ}$ при ширине отбиваемого слоя 16-18м (расстояние между осями выпускных выработок), угол наклона секции отбойки – $82-87^{\circ}$.

8. Установлено, что на показатели извлечения при торцевом выпуске высота отбиваемого слоя имеет второстепенное воздействие по сравнению с её шириной, углами откоса траншеи и высотой выпускаемого слоя.

9. Выделено 5 областей первоначального положения руды, относимой к потерям, внутри секции отбойки. Для каждой области дана прогнозная оценка снижения этих потерь при выпуске руды из соседних выемочных единиц.

10. Разработаны рациональные планы выпуска руды из очистного пространства в условиях хибинских апатит-нефелиновых месторождений.

11. Результаты моделирования использованы при разработке методики обоснования оптимальных параметров системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды для рудников КФ «АО Апатит».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих научных работах.

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1) Лукичев С.В., Лаптев В.В. Изучение механизма истечения руды при торцевом выпуске на основе численного моделирования поведения горной массы с неоднородным гранулометрическим составом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11 (специальный выпуск 37). – С. 214–223. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-214-223.

2) Лаптев В.В., Лукичев С.В. Использование метода дискретных элементов для исследования механизма формирования потерь руды применительно к условиям торцевого выпуска // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. – 2023. № 4. С. 52-29.

В прочих изданиях:

1) Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности: монография / коллектив авторов; под науч. ред. С.В. Лукичева. – Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2019. – 192 с.: ил. (разделы 3.9, 3.13).

2) Лаптев В.В. Анализ исследований в области компьютерного моделирования процесса выпуска для систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород // Проблемы недропользования. -2018. - №3 (18). С. 107-122.

3) Лаптев В.В. Численное моделирование потока раздробленной горной массы в процессе выпуска руды с использованием программы ROCKY DEM // Вестник МГТУ. - 2019. - Т. 22, - № 1. - С. 149–157.