



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

Уральского отделения Российской академии наук

(ИГД УрО РАН)

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИГД УрО РАН, д.т.н.


И.В. Соколов

« 27 » 10 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ФГБУН ИГД УрО РАН) на диссертационную работу **Лаптева Владимира Викторовича** «Исследование механизма формирования потерь и разубоживания руды на основе численного моделирования процесса торцевого выпуска», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

В ИГД УрО РАН представлена диссертация В.В. Лаптева, изложенная на 128 страницах машинописного текста, состоящая из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы в 94 наименований (из них 28 на иностранном языке) и автореферат диссертации.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Лаптева Владимира Викторовича посвящена исследованию механизма формирования потерь и разубоживания при системах разработки с подэтажным обрушением руды и вмещающих пород.

При ведении подземных горных работ наибольшей производительностью отличаются системы разработки 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 подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды, имеющей на сегодняшний день наиболее широкое применение среди систем с обрушением, более 70% объема 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.

Исследованию механизма формирования и методик прогнозирования потерь и разубоживания руды при выпуске посвящено значительное количество трудов отечественных и зарубежных учёных. 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 в условиях очистных блоков.

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 горной массы 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 горной массы создаёт необходимую инструментальную базу для исследований и оптимизации параметров конструктивных элементов системы разработки и режимов выпуска руды.

Общая характеристика работы

Диссертационное исследование посвящено решению актуальной научно-практической задачи, заключающейся в разработке методики имитационного моделирования торцевого выпуска руды для оценки потерь и разубоживания при системах разработки с подэтажным обрушением руды и вмещающих пород.

В первой главе диссертации обобщен опыт и обоснованы направления исследований.

Сделан вывод о том, что в настоящее время, несмотря на более чем 80-летнюю историю исследований до сих пор нет единого мнения об отдельных ключевых особенностях поведения раздробленной горной массы 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.

Обзор результатов исследований подтвердил необходимость дальнейшего изучения поведения сыпучей среды при выпуске, что позволит совершенствовать методы повышения показателей извлечения. Особенно это важно в связи переходом значительного числа горнодобывающих предприятий от применения этажных систем с обрушением к подэтажным с торцевым выпуском руды, где существует ряд проблем, связанных с недостаточным пониманием механизмов, влияющих на показатели извлечения руды.

Анализ публикаций показал, что наиболее эффективным на сегодня методом

исследования процесса выпуска руды является его численное моделирование, позволяющее по сравнению с физическим моделированием существенно повысить точность воспроизведения реальных условий выпуска горной массы и снизить сроки экспериментальных исследований.

Во второй главе диссертации на основе анализа литературных данных и результатов численных экспериментов показано, что эффективным инструментом изучения поведения горной массы при её выпуске является метод дискретных элементов, реализованный в программе RockyDEM.

На основе анализа результатов численного моделирования установлено, что траектории движения кусков горной массы к выпускному отверстию в большей степени соответствуют графику кубической функции, а не параболической. По параболической траектории куски стремятся не к выпускному отверстию, а к центральной зоне потока, обладающей наибольшей скоростью движения.

Для радикального сокращения времени моделирования процесса выпуска горной массы разнородного гранулометрического состава можно использовать модель кусков горной массы сферической формы с подбором для моделируемых условий коэффициента сопротивления качению, а также коэффициентов статического и динамического трения.

Для численного моделирования поведения сыпучего материала при выпуске помимо заверки свойств материала по углу естественного откоса и углу обрушения требуется заверка модели по основным особенностям поведения материала в моделируемых условиях.

В третьей главе произведено численное моделирование процесса торцевого выпуска руды на примере отработки Хибинских месторождений.

Результатами исследований подтверждено, что на показатели извлечения значительное влияние оказывают углы откоса траншеи и наклона секции.

При углах откоса 80° наблюдались наименьшие потери руды (с учётом доизвлечения её при выемке последующих секций в панели) и наименьшее разубоживание. Однако использование таких углов потребует повышенных расходов на проведение горно-подготовительных работ.

Для повышения показателей извлечения в рамках одной панели следует подбирать такие углы откоса траншеи, чтобы ширина секции отбойки максимально соответствовала ширине фигуры выпуска при её развитии на полную высоту.

Угол наклона секции с точки зрения оптимизации показателей извлечения следует принимать равным 85° в сторону обрушаемого массива для более точного совпадения фигуры выпуска и геометрии секции отбойки.

В четвертой главе проведено исследование механизма формирования потерь и разубоживания руды для условий подэтажной отбойки и торцевого выпуска.

В результате проведённых экспериментов были установлены значения углов формирующих фигуру выпуска и показано, что фигура выпуска отклоняется от откосов траншеи на некоторый угол, зависящий от угла откоса траншеи. Для угла откоса 70° угол образующей составил $72-73^\circ$, для откоса 65° – образующая 68° , для откоса 60° –

образующая 64° . Для угла откоса 80° на начальных стадиях образующая фигуры выпуска также отклонялась от стенок откоса на $1-2^\circ$, однако при развитии полностью совпадала с геометрией откосов. Угол откоса рудной постели составляет значения $58-60^\circ$ в зависимости от объёма извлечённой горной массы.

Экспериментально для наиболее распространённой конфигурации параметров конструктивных элементов на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях были определены объёмы руды, отнесённой к потерям верхнего подэтажа, перепускаемые на нижние подэтажи и доизвлекаемые там. При поочерёдном выпуске горной массы из панелей 2 подэтажа выпускается $6,1\%$ потерь 1 подэтажа, при одновременном – $6,4\%$. На 3 подэтаже доизвлекается ещё $2,1\%$ и $2,4\%$ потерь 1 подэтажа для моделей с поочерёдным и одновременным выпуском панелей на 2 подэтаже соответственно. Вариант с одновременным режимом выпуска горной массы из панелей 2 подэтажа показал себя как более эффективный.

Показано, что управление качеством извлекаемой горной массы при подэтажной системе разработки с торцевым выпуском для извлекаемой секции отбойки возможно осуществлять за счёт выбора момента остановки выпуска в предыдущих секциях отбойки. Для обеспечения минимальных потерь по панели, рациональным для остановки выпуска горной массы из текущей секции является момент, когда фигура выпуска развивается на ширину, равную ширине секции отбойки. Для улучшения среднего качества полезного компонента в выпускаемой горной массе необходимо, чтобы высота фигуры выпуска при её развитии на полную ширину отбиваемой секции была меньше её высоты. Таким образом, руда из верхней части секции отбойки будет выпускаться при извлечении следующего слоя панели и обеспечит более высокие показатели качества.

Экспериментально установлено, что траектории движения кусков горной массы при торцевом выпуске также как и при донном могут быть описаны уравнением кубической функции. Кривизна траектории зависит от начального положения куска горной массы в раздробленном массиве относительно выпускного отверстия.

Научная новизна заключается в применении метода дискретных элементов для изучения закономерностей движения кусков раздробленной горной массы 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

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: надёжностью 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 горной массы в процессе выпуска руды, полученных в результате численного имитационного моделирования.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке: численной имитационной модели торцевого выпуска горной массы 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; рациональных планов выпуска руды из очистного пространства.

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».

Научные результаты имеют значение для теории и практики разработки месторождений твердых полезных ископаемых подземным способом, а выводы и рекомендации достоверны и достаточно обоснованы. Основные положения работы апробированы на 6 научно-практических конференциях. Результаты проведенных автором исследований опубликованы 5 статьях отечественных научных изданий, 2 из которых входят в перечень рекомендованных ВАК; также материалы исследований вошли в раздел опубликованной монографии.

О стиле и языке диссертации и автореферата. Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Диссертационная работа написана грамотным языком, оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». Автор использует общепринятую научную терминологию, что делает работу доступной для восприятия специалистами. Выводы и рекомендации работы изложены четко и лаконично. Структура и содержание автореферата соответствуют основным положениям диссертации.

Представленная диссертация может быть квалифицирована как самостоятельное законченное научно-квалификационное исследование, соответствующее паспорту специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы научными организациями при выполнении предпроектных исследований, горными предприятиями при разработке эксплуатационных и инструктивных материалов, а также ВУЗами горного профиля при подготовке инженеров по специальности «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых».

Замечания по диссертации и автореферату

1. Автор утверждает, что достоверность научных положений и выводов подтверждается сходимостью полученных при моделировании результатов с основными положениями теории выпуска руды. Однако, наиболее известные теоретические подходы Малахова – Куликова (теория эллипсоидов), Н.Г. Дубынина, Ревуженко – Стажевского, и других исследователей различаются существенно, поэтому трудно судить, какая именно теория имеется в виду.

2. При определении параметров численной модели в качестве характеристики сыпучих свойств материала применяется термин «показатель сыпучести». Данный термин используется В.В. Куликовым, и однозначно определяет параметры эллипсоида выпуска. Автор вполне определенно говорит, что фигура выпуска не является эллипсоидом, поэтому здесь термин «показатель сыпучести» требует уточнения. В диссертации «показатель сыпучести характеризуется углами, под которыми фрагменты сыпучего материала перемещаются внутри моделируемого пространства и объемами перемещающегося материала из одной области модели в другую», но как эти углы и объемы трансформируются в единый показатель сыпучести, не показано.

3. При выборе эквивалентного размера куска для имитационного моделирования в качестве основы сравнения принят разнородный гранулометрический состав руды с размером кусков 0,15 - 0,8 м, т. е. чисто кусковый материал. Однако на практике даже в кусковых рудах присутствует достаточно большое количество мелочи (по Малахову с размером куска меньше 0,05 м), заметно влияющее на процесс истечения руды. Поэтому возникают определенные сомнения, насколько адекватен принятый размер эквивалентного куска реальным условиям выпуска руды.

4. Описание проведенных экспериментов начинается с того, что в модель «засыпается материал», «ставятся перемычки, которые затем извлекаются». Такой процесс характерен для физического моделирования, а не реального процесса отбойки и выпуска руды. Возникает вопрос: данные эксперименты - это физическое моделирование или все же имитационное компьютерное?

5. При имитационном моделировании торцового выпуска принято, что отбиваемый слой имитируется рудой с уплотнением, которая расширяется в сторону ранее отработанного массива. Но за счет этого происходит уплотнение породы предшествующего слоя, что затрудняет расширение фигуры выпуска в сторону фронтальной плоскости. Из диссертации не ясно, учитывалось ли это явление при моделировании, и если учитывалось, как оно повлияло на определяемые размеры фигуры выпуска.

6. На наш взгляд, следовало представить конструкцию системы разработки поэтажного обрушения с установленными автором оптимальными применительно к условиям Хибинских месторождений параметрами и провести технико-экономическое сравнение с традиционным вариантом технологии.

