

УДК 622.646:004.94

Лаптев Владимир Викторович
стажер-исследователь, аспирант,
Горный институт КНЦ РАН,
184209, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24
e-mail: laptev@goi.kolasc.net.ru

**АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ВЫПУСКА РУДЫ
ДЛЯ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ
С ОБРУШЕНИЕМ РУДЫ
И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД**

Аннотация:

Рассмотрены известные алгоритмы и инструменты компьютерного моделирования процесса выпуска руды при использовании систем разработки с обрушением. Результаты анализа показали, что современные подходы, как правило, основываются на расчетах по геометрическим параметрам фигур выпуска и используют стохастические модели. Это позволяет при вычислениях предсказывать основные показатели извлечения руды и строить планыграммы выпуска. В статье обозначены недостатки существующих подходов, рассмотрены перспективы их развития, а также проанализирована возможность применения для моделирования программных продуктов, использующих метод дискретных элементов. В результате сформулированы задачи для создания инструмента, который при моделировании отображал бы физическую суть процесса выпуска.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, выпуск руды, системы разработки с обрушением, горно-геологические информационные системы, показатели извлечения руды, метод дискретных элементов

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.107

Laptev Vladimir V.
PhD student, intern researcher,
Mining Institute of KSC RAS,
184209, Apatity,
Fersman st., 24
e-mail: laptev@goi.kolasc.net.ru

**THE ANALYSIS OF STUDIES
ON THE FIELD OF THE ORE DRAW
PROCESS SIMULATION
FOR DEVELOPING SYSTEMS
BY CAVING OF ORE
AND ENCLOSING ROCKS**

Abstract:

In the article existing methods and tools of ore draw simulation for develop systems with ore caving have been considered. The results of the analysis have shown, that the current approaches to the simulation, as the rule, are based on calculations of geometric parameters of the shape of the draw envelope (ellipsoids) and use stochastic models. It allows to predict the results of the ore draw and to form the diagrams. The article outlines the deficiencies of existing approaches, discusses the prospects for their development; and the possibility of applying software products using the discrete element method for modeling has been analyzed. As a result, the tasks on creating a tool that can model the physical nature of the ore draw has been formulated

Key words: computer simulation, ore draw, caving development systems, mining-geological information systems, ore output indicators, discrete element method

Разработка месторождений полезных ископаемых в современных условиях все чаще опирается на использование информационных систем для решения задач горной технологии на всех этапах – от геологоразведочных работ до закрытия предприятия и рекультивации земель. Более того, в настоящее время без использования горно-геологических информационных систем (ГГИС) стало невозможным добиться ни максимально полного извлечения полезных ископаемых из недр, ни требуемого уровня производительности труда инженерно-технических специалистов, ни автоматизации технологических процессов производства [1].

При ведении подземных горных работ наибольшей производительностью отличаются системы разработки месторождений полезных ископаемых с обрушением руды и вмещающих пород. На экономическую эффективность этих систем значительно влияет процесс выпуска отбитой руды из блока. От его организации зависят качество и полнота извлечения полезного ископаемого из недр – важнейшие технико-экономические показатели системы разработки. Для эффективного планирования показателей потерь и разубоживания возможно использование имитационного моделирования процесса выпуска руды с использованием информационных (компьютерных) технологий.

Исследованиям процесса выпуска руды посвящено значительное количество трудов отечественных и зарубежных ученых. основополагающими являются подходы М.И. Агошкова, Г.М. Малахова, В.В. Куликова, В.Р. Именитова, Н.Г. Дубынина, R. Kvaril и др. [2]. Основаны они, как правило, на расчетах по эмпирическим формулам геометрических параметров фигур выпуска.

На основе данных подходов создано несколько компьютерных программ. Как правило, разработаны они на основе программных продуктов AutoCAD и Microsoft Excel в сочетании с такими ГГИС, как Micromine, Datamine и др.

В частности, Д.Е. Малофеевым и др. [3] была разработана компьютерная программа, которая на базе средств ГГИС Micromine с использованием возможностей Microsoft Excel позволяет обосновать показатели полноты и качества извлечения запасов недр. Суть ее сводится к дискретизации выемочной единицы (блока) рудного тела до размера среднего куска руды, получаемого после взрывных работ, и дальнейшим расчетам кинематической схемы истечения кусков руды из блока. Данные по характеристикам исходного участка массива определяются средствами ГГИС, а затем пересчитываются разработанной авторами программой-макросом в табличном процессоре Excel для дальнейшего обоснования проектных решений [3]. Среди недостатков данного подхода стоит отметить невозможность расчета прогнозных показателей извлечения в отдельной дозе выпуска, что необходимо для более точного управления процессом. Тем не менее программа позволяет моделировать различные режимы выпуска руды для наиболее часто применяемых вариантов систем разработки месторождений, что делает ее достаточно универсальным инструментом.

Другим вариантом данного подхода является разработанная в Московском государственном горном университете (сейчас – МГИ НИТУ «МИСиС») для АО «Жильская ГМК» компьютерная программа стохастического моделирования выпуска руды MineCAD [4]. Аналитическое описание процесса выпуска и расчеты показателей извлечения основаны на использовании, как минимум, четырех методов расчета: последовательных подстановок, графоаналитического, графического и на основе компьютерной матрицы выпуска. По мнению авторов программы, стохастическая модель, разработанная на базе исследований В.Р. Именитова, В.В. Куликова, Г.А. Малахова, Н.Г. Дубынина, Р.Г. Пепелева и др., на сегодняшний день является наиболее перспективной. При построении весь выемочный блок так же, как и в подходе Д.Е. Малофеева, разбивается на единицы объема размерами среднего куска руды. После задания параметров программа строит модель рудного тела, а затем ведет расчет движения руды под собственным весом. Моделируемый выпуск руды дозируют на объем ковшей погрузочно-доставочной машины. Каждая доза вносит свой вклад в рассчитываемые показатели извлечения руды. Стоит отметить, что работа программы ориентирована на моделирование выпуска руды при использовании системы разработки с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Важными особенностями данной программы являются возможность учета одновременного выпуска руды с нескольких горизонтов (подэтажей) и отслеживания траектории движения отдельных кусков массива горных пород.

Еще один представитель вышеуказанных подходов – программный комплекс FlowDelevel, разработанный Е.Л. Левиным [5] на основе стохастической модели выпуска руды В.В. Куликова [6]. Алгоритм позволяет с использованием блочного моделирования рудного тела осуществлять планирование выпуска руды на заданный объем блока с разбивкой на плановые периоды (годы, кварталы, месяцы, декады, смены). По результатам выпуска формируются отчеты с показателями извлечения полезного ископаемого из недр. Состояние запасов на любой момент выпуска может быть сохранено в графическом и текстовом файлах и в дальнейшем использовано при планировании выпуска нижележащих и смежных блоков [5].

На основе подхода Е.Л. Левина ОАО «ВИОГЕМ» [7] реализовало свою методику моделирования выпуска на базе ГГИС Геомикс в виде дополняющего ее функционального модуля FlowFrame. В алгоритме выпуск руды отнесен к нестационарным физическим процессам массопереноса, которые описываются дифференциальным уравнением параболического типа. Для описания процесса выпуска руды из нескольких выпускных отверстий данное уравнение решается численным методом переменных направлений с постановкой граничных условий. При моделировании отслеживается вероятность смещения материала в ячейках блочной модели рудного тела из вышележащего горизонтального слоя в нижележащий с перераспределением значений содержания полезного компонента. Численными расчетами определяется весовая функция и элементарный объем перераспределения выпускаемого материала. На основе этих параметров по алгоритмам рассчитывается перераспределение выпускаемой руды снизу вверх. Также особенностью описанной методики моделирования является возможность учета фильтрации и сепарации пород на основе коэффициентов фильтрации и сепарации, определяемых эмпирически при сравнении результатов реального выпуска руды и численных экспериментов.

Рассмотренные методики являются основными и наиболее используемыми в настоящее время в отечественной практике. Их анализ показал следующие общие особенности:

1) При использовании стохастических моделей истечения кусков отбитого массива горных пород в качестве фигуры выпуска принимается, как правило, эллипсоид вращения или трехосный эллипсоид. У такого подхода имеется два недостатка. Во-первых, стохастическая модель предполагает, что частицы сыпучей среды перемещаются под действием силы тяжести по так называемым ячейкам и не могут занимать промежуточного положения. То есть частица находится либо в своей клетке, либо целиком перемещается в соседнюю, что не соответствует реальному движению кусков отбитой горной массы при выпуске из блока. Во-вторых, фигура выпуска, согласно обширным исследованиям [8], может принимать различные формы (трехосный эллипсоид, эллипсоид вращения, конусообразную, конус-цилиндр-полусфера, форму пламени факела и др.) в зависимости от множества характеристик сыпучей среды, что существенно влияет на показатели извлечения.

2) Использование в качестве одной из основных характеристик среднего размера куска руды. На практике гранулометрический состав раздробленного массива горных пород не может быть однородным. При выпуске руды форма и объем фигуры выпуска значительно зависят от размера куска и коэффициента разрыхления выпускаемой горной массы, а вершина свода фигуры выпуска отклоняется в сторону наибольшей скорости выпускаемого потока [9]. Вероятность того, что кусок с меньшим размером займет освобождающийся при выпуске объем, выше, значит, скорость потока на данном участке будет более высокой, и фигура выпуска сместится в эту сторону, в результате чего прогнозные показатели извлечения примут иные значения.

3) Слабый учет взаимодействия и влияния друг на друга нескольких выпускных отверстий, режима выпуска руды, неоднородности контакта руды и породы, бокового разубоживания и других важных параметров, существенным образом влияющих на показатели извлечения руды.

4) Отсутствие единого методического подхода для прогнозирования показателей выпуска руды. Большинство методик и программ разрабатывалось для конкретных месторождений или систем разработки, и они достаточно сложно адаптируются для расчетов показателей извлечения для других условий. Соответственно, и создаваемый на базе данной методики инструмент компьютерного моделирования процесса выпуска может применяться лишь для отдельного месторождения. Причиной этого является то, что описанные алгоритмы расчетов не отображают физической сути процесса – движения и взаимодействия большого числа частиц.

Перечисленные методики компьютерного моделирования процесса выпуска руды позволяют с приемлемой для производственных целей достоверностью рассчитать прогнозные показатели извлечения руды для заданных условий, построить планограммы выпуска и проанализировать по полученным результатам эффективность того или иного варианта применяемой технологии. Однако анализ показал, что они описывают этот процесс приближенно и слабо учитывают некоторые особенности реальных условий.

Для создания инструмента, моделирующего физическую суть процесса выпуска руды, предлагается использовать иной подход. В последнее время, за счет значительно возросших вычислительных возможностей персональных компьютеров, для решения технологических задач в области добычи и переработки полезных ископаемых все чаще применяется программное обеспечение, использующее при расчетах метод дискретных элементов (МДЭ).

МДЭ предназначен для вычисления результатов взаимодействия большого количества частиц, таких как молекулы, галька, песчинки и т.п. Метод был первоначально применен в 1971 г. для решения задач механики горных пород, и в дальнейшем область его использования расширялась. Поскольку раздробленный массив горных пород можно рассматривать как сыпучую среду, а процесс выпуска – как взаимодействие большого количества частиц, то это позволило найти применение МДЭ для моделирования процесса выпуска руды [10, 11].

Проанализировав доступные платформы, реализующие МДЭ, было решено использовать для создания модели выпуска руды программный продукт Rocky [12], разработанный американской компанией «Granular Dynamic International» (авторизированный дистрибьютор в России и странах СНГ - ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс») для моделирования поведения сыпучих сред. Одной из существенных особенностей данного программного продукта является возможность задавать неоднородный гранулометрический состав сыпучей среды и использовать при моделировании частицы любой формы, кроме того использование МДЭ позволяет более точно описать кинематическую схему взаимодействия частиц при выпуске.

Для изучения перспектив применения данного инструмента при решении поставленных задач были проведены пробные эксперименты с выпуском частиц из бункера с одним – тремя отверстиями. Геометрической модели задавались такие размеры, чтобы предполагаемая фигура выпуска не касалась стенок бункера. Было опробовано свободное истечение и имитация вибровыпуска: в дучке устанавливалась вибрирующая пластина. Параметры пластины задавались согласно характеристикам вибропитателя ВДПУ-4ТМ. Все модели объектов создавались в ГГИС Mineframe [13] и в дальнейшем импортировались в Rocky. В экспериментах моделировалась сыпучая среда из 70 - 150 тыс. частиц с распределением их по размерам от 0,4 до 1,2 м. Частицы имели характеристики, схожие с апатито-нефелиновой рудой, форма кусков выбиралась шарообразная и фасеточная (граненая).

Результаты экспериментов показали возможность моделирования процесса выпуска руды при помощи программного продукта Rocky. Расчет по предварительным оценкам производится достаточно точно: при корректной настройке всех значений формируемые фигуры выпуска, углы естественного откоса и сам процесс истечения сыпучего материала из бункера подобны данным, полученным из экспериментов на реальных и физических моделях [8, 9]. Стандартные инструменты анализа программы позволяют производить детальные исследования смоделированного процесса выпуска. Это предоставляет возможности для выявления новых закономерностей и совершенствования теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами.

Однако большим препятствием при использовании дискретных методов, учитывающих большинство параметров системы, является их вычислительная сложность. Некоторые расчеты в программе занимали достаточно длительное время - от нескольких

часов до нескольких дней, особенно если в модели использовались несферические частицы различной крупности. Выходом из текущего положения может являться увеличение вычислительных мощностей персональных компьютеров, на которых производятся расчеты. Распараллеливание вычислений позволяет сократить время ожидания в десятки раз.

В дальнейшем планируется продолжать моделирование процесса выпуска руды в дискретных средах, в том числе с использованием моделей реальных технологических схем рудников для изучения механизмов перемещения частиц различной крупности и выявления новых закономерностей.

В результате работы на платформе данного программного продукта планируется создать инструмент, моделирующий процесс выпуска. Данная программа должна иметь возможность адаптироваться для расчета выпуска при применении всех существующих вариантов систем разработки месторождений, т.к. в расчетах конструктивные параметры очистного пространства используются как геометрические модели, в рамках которых производятся вычисления движения частиц. Инструмент также должен взаимодействовать с существующими ГГИС для наиболее полного учета исходных данных о состоянии массива горных пород до выпуска и использования результатов моделирования процесса.

Литература

1. Наговицын О.В. Горно-геологические информационные системы – история развития и современное состояние / О.В. Наговицын, С.В. Лукичев. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2016. – 196 с.
2. Леонтьев А.А. Методика расчёта показателей извлечения полезного ископаемого для системы разработки с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды / А.А. Леонтьев, Ю.В. Демидов, В.В. Белоусов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. - № 7. – С. 48 - 55.
3. Малофеев Д.Е. Выработка и обоснование проектных решений по разработке месторождений технологией с обрушением, обеспечивающих полноту и качество извлечения запасов недр / Д.Е. Малофеев, А.М. Гильдеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. - № 3. – С. 39 - 44.
4. Савич И.Н. Обоснование параметров системы и нормативных показателей извлечения при применении технологий, предусматривающих выпуск руды под обрушенными породами / И.Н. Савич, Т.А. Гагиев, А.А. Павлов // Рациональное освоение недр. – 2011. - № 4. – С. 60 - 63.
5. Евгений Левин. Программы для 3Dмоделирования выпуска руды (системы с обрушением), оптимизации карьеров [Электронный ресурс] – Режим доступа: delevelcad.narod.ru, свободный.
6. Куликов В.В. Выпуск руды / В.В. Куликов. – М.: Недра, 1980. – 303 с.
7. Кабелко С.Г. Компьютерная технология прогнозной оценки показателей выпуска руды при разработке месторождений системами с обрушением руды и породы / С.Г. Кабелко, В.А. Дунаев, А.В. Герасимов // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. - № 8. - С. 54 - 61.
8. Малофеев Д.Е. Развитие теории и практики выпуска руды под обрушенными породами: монография / Д.Е. Малофеев. – Красноярск: Изд-во Сибирский федеральный ун-т; Ин-т цвет. металлов и золота, 2007. – 172 с.
9. Демидов Ю.В. Подземная разработка мощных рудных залежей / Ю.В. Демидов, В.Н. Аминов. – М.: Недра, 1991. - 205 с.
10. Rayo J.D., Mercado J.M., Encina V. Simulation of block caving operation using a discrete element method (DEM) /Conference Paper of Minin 2016 – 6th International Conference on Innovation in Mine Operations, Santiago, Chile.



11. Cleary P.W. DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge / Paul W. Cleary, Mark L. Sawley // Applied Mathematical Modelling. – 2002. - 26. - P. 89 – 111.

12. ROCKY – моделирование динамики частиц методом DEM [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.rocky-dem.ru, свободный.

13. Система MINEFRAME - комплекс программных средств для автоматизированного планирования и проектирования горных работ [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.mineframe.com, свободный.