

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ГОРНЫХ РАБОТ НА ПАРАМЕТРЫ ВЫПУСКА РУДЫ ПОД ОБРУШЕННЫМИ ПОРОДАМИ

С.А. Неверов, С.Ю. Васичев, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Россия

Приведен анализ параметров выпуска руды на действующих предприятиях горной промышленности при системах разработки с обрушением. Выполнена оценка природных и техногенных факторов, ограничивающих выпуск отбитой горной массы с ростом глубины. Описаны три условия истечения руды, наиболее часто встречающиеся при подземной разработке месторождений.

Введение

Точка зрения об ограниченности применения геотехнологий с обрушением руды и вмещающих пород на больших глубинах в настоящее время перестает быть очевидной и обязательной для разрабатываемых месторождений. Это связано, в первую очередь, с постоянным совершенствованием средств, способов и технологических схем эффективного управления горным давлением, процессами сдвижения породного массива и параметрами выпуска руды.

В зарубежной и отечественной практике имеются успешные примеры освоения систем этажного и подэтажного обрушения на глубинах свыше 1000 м. К таким предприятиям можно отнести рудники Казахстана (Зыряновский), Украины (Им. Дзержинского, Им. Кирова, Первомайский), Швеции (Кируна, Мальмбергет, Хаксберг), Австралии (Маунт Айза), Канады (Муррей, Фруд, Крайгмонт), Замбии (Муфулира), а также отечественные подземные рудники (Молибден, Центральный). В связи с этим имеющаяся на сегодняшний день концепция добычи руды системами с обрушением руды и вмещающих пород на глубоких горизонтах требует проведения дополнительных исследований и уточнений. Актуальность этого направления также усиливается возможностью автоматизации основных и вспомогательных процессов добычи руд. Геотехнологии данного класса систем разработки, как показывает зарубежная практика, наиболее приспособлены и адаптированы к автоматизации процессов очистной выемки и являются перспективным направлением для развития горных предприятий при переходе на высокопроизводительное самоходное оборудование. Область их применения до сих пор не изучена, ряд специалистов ограничивают освоение их глубинами 1000-1200 м.

Выпуск руды под обрушенными породами

Известно, что глубина разработки вносит коррективы не только в напряженно-деформированное состояние (НДС) породного массива, но и в НДС отбитой рудной массы, в частности оказывает влияние на ее сыпучие свойства, от которых зависит эффективность процесса выпуска. Изменение сыпучих свойств отбитой руды и породы (далее – сыпучий материал) с глубиной разработки связано с развитием процессов уплотнения, слеживания и запрессовки в очистных забоях.

Повышение слеживаемости сыпучего материала обусловлено временем выпуска, повышением температуры горных пород и наличием глинистых, карбонатных и глинисто-карбонатных минералов. Процесс уплотнения объясняется ростом горного давления сыпучего материала (в большей степени под воздействием гравитационных сил), гранулометрическим составом и увеличением избирательного истирания кусков отбитой руды и обрушенных пород, способствующих повышению плотности их упаковки. Отбойка руды в зажатой среде, получившая распространение при системах разработки с обрушением, способствует на больших глубинах к развитию запрессовки сыпучей среды. В результате всего этого создаются стесненные условия для выпуска руды, обуславливающиеся возникновением сил сцепления [1 – 3].

В процессе истечения руды из слоя образуются две характерные области: зона течения (подвижная зона) и неподвижная зона (зона, ограниченная областью влияния выпускного

отверстия). Границей между данными областями является поверхность скольжения. Основные её параметры определяются коэффициентом внутреннего трения (k) и сцепления (c).

Под сыпучей средой понимается материал без сцепления $c = 0$ или с весьма малой связностью $c \rightarrow 0$ [4, 5]. Однако это условие справедливо до определенных глубин, когда поверхность сопротивления между кусками отбитой руды незначительна по сравнению с их объёмом и, следовательно, молекулярные силы между ними малы по сравнению с их весом. В условиях же понижения горизонта выемки и роста горного давления (увеличения веса обрушенных пород) возрастает сопротивление между кусками отбитой руды, провоцируя возникновение сил сцепления. Последние наиболее интенсивно развиваются в мелких (размер в поперечнике < 50 мм) некрепких рудах с коэффициентом крепости по шале М.М. Протодьяконова $f \leq 4$ и снижают в дальнейшем свое влияние в крепких с $f \geq 8$ средне и крупно кусковых рудах (размер в поперечнике > 100 мм) [3, 4]. Применительно к разработке мощных крутопадающих залежей в наибольшей степени подходят крепкие средне и крупно кусковые отбитые руды, и крупно кусковые обрушенные породы. Именно такого гранулометрического состава и крепости приняты для дальнейшего анализа и исследования сыпучие материалы, наиболее полно отвечающие принятым параметрам рудных залежей и рассматриваемым системам их разработки.

Наиболее эффективным критерием, оценивающим сыпучие свойства и параметры зон потоков выпуска разрыхленного материала, является показатель сыпучести ρ [2, 4]. Этот показатель вбирает в себя такие характеристики сыпучих сред как: гранулометрический состав, плотность упаковки, коэффициент разрыхления, влажность, слеживаемость и угол внутреннего трения, которые в своей совокупности оказывают существенное влияние на параметры истечения раздробленного материала. Особое внимание уделяется коэффициенту разрыхления и гранулометрическому составу.

Выпуск руды под обрушенными породами осуществляется, в первом приближении, из фигур по форме и объемам, которые напоминают эллипсоиды вращения (рис. 1).

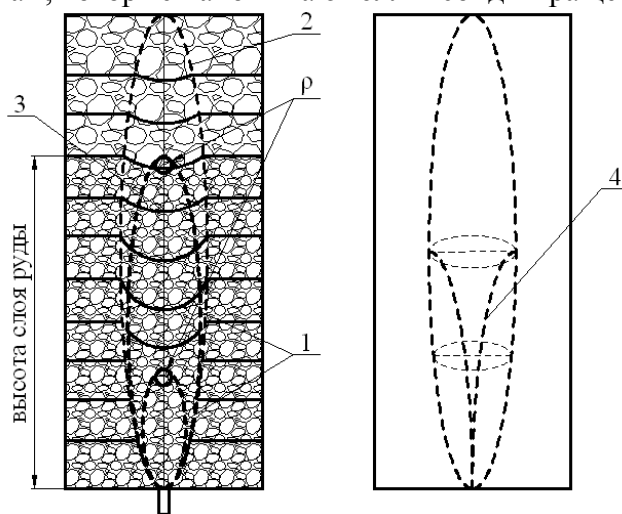


Рис. 1. Выпуск руды под обрушенными породами: 1 – эллипсоид выпуска; 2 – эллипсоид разрыхления (потенциально выпускаемый материал); 3 – воронка прогиба; 4 – воронка внедрения; ρ – показатель сыпучести

Физический смысл показателя сыпучести заключается в том, что он показывает радиус кривизны фигуры выпуска. Следовательно, чем больше показатель сыпучести, тем большая эффективная площадь выпускаемой отбитой руды приходится на очистной забой. В условиях же явного проявления слеживания, уплотнения и запрессовки сыпучего материала показатель ρ снижается вследствие уменьшения ширины эллипсоида выпуска, фигура которого приближается к форме вытянутой «трубы». В результате этого «активная» площадь выпуска уменьшается, возрастают потери и разубоживание руды.

С одной стороны, снижение показателя сыпучести ведет к уменьшению параметров от-

бойки, а, следовательно, и уменьшению расстояний между выработками выпуска руды, с другой – с ростом глубины разработки увеличивается напряженное состояние пород, которое, для снижения концентрации нагрузок, требует, по условию устойчивости обнажений, снижения изрезанности массива горными выработками. Следствием последнего является увеличение параметров систем разработки, обеспечивающих достаточную устойчивость горным конструкциям.

В связи с этим возникает необходимость в проведении комплекса исследований по поиску рациональных параметров осваиваемых геотехнологий на больших глубинах, способствующих повышению безопасности горных работ и сохранению приемлемых показателей извлечения запасов из недр.

Связь параметров выпуска руды с глубиной разработки

Для определения влияния глубины разработки на процесс выпуска руды были проанализированы показатели извлечения более чем на 30 месторождениях [4, 6-11], обрабатываемых системами с обрушением руды и вмещающих пород. Показатели потерь и разубоживания руды для некоторых рудников при равнозначности параметров выемки представлены в табл. 1.

Из табл. 1, в общем случае, видно, что показатели извлечения до глубин 900-1000 м изменяются в пределах 30,0-45,0 % (относительных) в зависимости от конструкции применяемой геотехнологии и параметров отбойки. При понижении горных работ на глубины свыше 1200 м, из небольшого набора имеющихся данных [3, 11], установлен существенный рост, более чем в 2,0 раза, показателей потерь и разубоживания руды. Это объясняется значительным изменением физико-механических и сыпучих свойств отбитой руды.

ТАБЛИЦА 1. Изменение показателей извлечения на выпуске с глубиной горных работ по характерным выемочным участкам месторождений, обрабатываемых системами подэтажного обрушения *.

Рудник	Глубина горных работ, м.				
	400	500	600	800	1000
Алтын-Топкан (Узбекистан)	$\frac{9,0}{15,4}$	$\frac{10,1}{18,7}$	$\frac{11,0}{18,7}$	-	-
Зыряновский (Казахстан)	$\frac{9,1}{10,0}$	$\frac{9,6}{11,2}$	$\frac{10,7}{12,0}$	-	-
Им. Дзержинского (Украина)	-	$\frac{9,2}{13,1}$	$\frac{11,3}{14,0}$	$\frac{13,2}{17,7}$	$\frac{14,1}{20,1}$
Им. Кирова (Украина)	-	-	$\frac{12,4}{10,7}$	$\frac{14,2}{13,0}$	$\frac{15,5}{17,3}$
Первомайский (Украина)	-	$\frac{9,8}{15,9}$	$\frac{10,7}{16,6}$	$\frac{11,8}{18,3}$	$\frac{14,0}{22,2}$
Молибден (Кабардино-Балкарии, Россия)	-	$\frac{9,1}{10,2}$	$\frac{10,3}{11,7}$	$\frac{10,8}{14,6}$	-
Центральный (Приморский край, Россия)	$\frac{8,7}{11,2}$	$\frac{10,1}{14,4}$	-	-	-

*Без учета конструктивных потерь и разубоживания. В числителе приняты значения потерь, в знаменателе – разубоживания руды.

На основании анализа и обобщения многолетнего опыта, теоретических и экспериментальных данных установлены силы, действующие на отбитую руду при выпуске в зависимости от глубины очистных работ. В частности, А.Б. Будько с высокой степенью достоверности установлены зависимости действующих вертикальных напряжений в раздробленной руде (табл. 2), вещественного и гранулометрического состава от изменения глубины разработки.

В настоящее время сформировалось представление о влиянии на процесс выпуска и пара-

метры уплотнения сыпучей среды с глубиной обработки соотношения действующих сил в сыпучем материале и прочности кусков отбитой руды различного гранулометрического состава (см. табл. 2). Это соотношение является критериальным признаком вероятности слеживания отбитой руды и выражается следующим безразмерным показателем [3]:

$$Z = \frac{\gamma H}{100\sigma_{сж}} \quad (1)$$

где γ – плотность пород, т/м³;

H – глубина разработки, м;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности отбитых пород на одноосное сжатие, МПа

ТАБЛИЦА 2. Силы, действующие на отбитую руду при выпуске*.

Тип руды	Силы собственного веса, МПа, способствующие выпуску руды		Силы сцепления МПа				
	В эллипсоиде выпуска		Глубина разработки, м				
	без учета зависаний	С учетом сводов зависаний	500	1000	1500	2000	2500
1	2	3	4	5	6	7	8
Крупнокусковые, крепкие руды ($f \geq 10$)	15,0-20,0	2,0-2,5	0,3	1,0	1,5	2,0	2,5
Смешанные, средней крепости руды ($4 \leq f \leq 10$)	10,0-15,0	1,5-2,0	0,5	1,5	2,0	3,0	3,5

*Параметры сил удовлетворительно коррелируют с натурными исследованиями при выемке мощных крутопадающих залежей системами с обрушением (данные А.В. Будько).

Превышение сил сцепления, возникающих в отбитой руде под влиянием горного давления, при выпуске над силами собственного веса сыпучего материала, с учетом сводов зависаний, обуславливает процесс интенсивного развития уплотнения.

Числовые значения, приведенные в табл. 2, экспериментально и теоретически определены рядом ученых [2-4], путем замера нагрузок, возникающих на измерительном приборе от давления сыпучего материала. Однако они характеризуют общую (наиболее вероятную) закономерность изменения сыпучих свойств отбитой руды с глубиной разработки и не являются обязательными для всех отрабатываемых месторождений. В условиях действующих рудников данные о распределении сил в раздробленном массиве требуют корректировок с учетом особенностей физико-механических свойств отбитой руды и породы.

Значения $Z < 0,25$ характеризуют свободный выпуск руды, при которых силы сцепления минимальны и не оказывают влияния на параметры зон потока сыпучего материала. При этом нагрузки и напряжения, возникающие в отбитой руде не достаточны для ее уплотнения и слеживания, что доказано практикой ведения горных работ. Для отрабатываемых месторождений, представленных крепкими рудами с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протодяконова $f \geq 12$, предельная глубина свободного выпуска ограничивается значениями $H = 1000 \div 1250$ м (табл. 3). Однако, имеются яркие примеры, когда на рудниках Криворожского железорудного бассейна свободный выпуск отбитой руды ограничивался глубиной горных работ 400 м. Это обстоятельство объясняется одновременной выемкой крепких и мягких руд. В связи с этим критерий (1) правомерен для крепких, средне и крупнокусковых

пород и является прогнозной (вероятной) оценкой, характеризующей свободный выпуск сыпучего материала.

При значениях Z от 0,25 до 0,6 начинают появляться и увеличиваются нарушения прочности кусков отбитой руды и обрушенной породы по их контактам. В результате этого начинают развиваться процессы уплотнения, и выпуск руды становится стесненным. Эти явления, обуславливающие ограниченность истечения сыпучих материалов, характерны для глубин $H = 1250 \div 1600$ м (см. табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Предельная глубина, характеризующая выпуск руды под обрушенными породами.

Типы руд	Глубина горных работ (условия выпуска),		
	Свободный выпуск руды. $Z < 0,25$	Стесненный выпуск руды. $0,25 \leq Z \leq 0,6$	Ограниченный и затрудненный выпуск руды. $Z > 0,6$
Крупнокусковые, крепкие руды ($f \geq 12$)	1000-1250	1250-1700	> 1700
Среднекусковые руды ($8 \leq f \leq 12$)	800-1100	1100-1500	> 1500
Смешанные, средней крепости руды ($4 \leq f \leq 8$)	600-800	800-1200	> 1200

Дальнейший рост $Z > 0,6$ ведет к интенсификации процесса слеживания и запрессовки отбитой руды, затрудняя ее выпуск. Наиболее вероятная глубина для показателя $Z > 0,6$ составляет более 2000 м.

Значения безразмерного показателя Z для различных глубин горных работ хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями и производственными данными на действующих рудниках Криворожского железорудного бассейна, Казахстана, Урала, Кольского полуострова, Западной Сибири и Дальнего Востока.

Выводы.

В результате проведенного комплекса исследований, на основе анализа и обобщения теоретических и производственных данных, сформировалось следующее представление о выпуске руды под обрушенными породами с учетом изменения глубины разработки.

1. В крупнокусковых (размер в поперечнике > 300 мм) крепких рудах с коэффициентом крепости по шкале М.М. Протождяконова $f = 10-20$ коэффициент разрыхления и прочность сыпучего материала с глубиной горизонта выемки снижаются медленно. По этой причине снижение сыпучих свойств раздробленных пород происходит постепенно. Для смешанных руд с $f = 4-10$ и различным гранулометрическим составом характерно более интенсивное изменение физико-механических и деформационно-прочностных свойств отбитой руды, в результате чего процесс уплотнения и слеживания становится более явным с вероятностью > 50 %. Фигура выпуска при этом принимает столбообразную форму.

2. Область и глубина эффективного применения систем разработки с обрушением определяются типом руд по гранулометрическому составу, коэффициенту разрыхления, крепости и величиной действующих, в основном, гравитационных сил. При превышении допустимой глубины выпуск горной массы становится малопродуктивным, требующим средств активного воздействия и новых конструктивных решений. Это объясняется пульсирующим характером процесса истечения сыпучего материала и систематическим его уплотнением под воздействием высокого поля напряжений.

Сложность определения сыпучих свойств и недостаток в исходной информации по выпуску руды под обрушенными породами на глубоких горизонтах предопределяют в качестве

оценки показателей извлечения использовать закономерности изменения показателя сыпучести на достигнутых глубинах в зависимости от изменения гранулометрического состава, коэффициента разрыхления, крепости пород и сил гравитации (горного давления). Иначе говоря, через показатель сыпучести выражается влияние глубины разработки – снижение сыпучих свойств, возникновения сил сцепления, развитие процессов слеживаяния и уплотнения – на показатели полноты и качества извлечения запасов из недр.

Выше изложенные особенности необходимо учитывать при физическом и математическом моделировании выпуска руды по определению рациональных параметров геотехнологий с обрушением по условию максимизации показателей извлечения минерального сырья.

Список литературы

1. Тележников Е.И. Влияние коэффициента разрыхления на истечение сыпучего материала / Е.И. Тележников. // В кн.: Труды ВЗПИ, М., 1974, № 89, с. 60-65.
2. Куликов В.В. Выпуск руды / В.В. Куликов. М., Недра, 1980. 303с.
3. Будько А.В. К определению допустимой глубины разработки месторождений системами с обрушением руды и вмещающих пород по условию выпуска руды / А.В. Будько. // Исследования проявления горного давления и технологии подземной разработки руд на больших глубинах. – М.: ИПКОН АН СССР, 1983, с. 48-58.
4. Именитов В.Р. Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений / В.Р. Именитов. – Учебное пособие для вузов, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984 – 504с.
5. Крамаджян А.А. Моделирование выпуска сыпучих материалов из ёмкостей / А.А. Крамаджян, С.Б. Стажевский, Г.Н. Хан // ФТПРПИ. – 1999. – № 4.
6. Агошков М.И. Разработка рудных и нерудных месторождений / М.И. Агошков, С.С. Борисов, В.А. Боярский. – М.: Недра, 1983.
7. Ерофеев И.Е. Подземная разработка месторождений полиметаллических руд / И.Е. Ерофеев, И.М. Никифоров, и др. – Недра, 1989. – 286с.
8. Слепцов М.Н. Подземная разработка цветных и редких металлов / М.Н. Слепцов, Р.М. Азимов, В.Н. Мосинец. – М.: Недра, 1986. – 206с.
9. Гановичев А.И. Развитие систем разработки на рудниках Зырянского региона / А.И. Гановичев, И.Т. Соболев, В.В. Шкарпетин // Горный журнал. – 1991г. – №4, с. 10 – 12.
10. Абрамов В.Ф. Создание новых конструкций и технологий на подземном руднике «Молибден» / В.Ф. Абрамов, С.А. Толстых, Г.Ф. Коган, и др. // Горный журнал. – 1990г. – №9, с. 32 – 34.
11. Филиппов Н.Ф. Совершенствование технологии очистной выемки на глубоких горизонтах / Н.Ф. Филиппов, В.А. Лубенец, и др. // Горный журнал. – 1987г. – №8, с. 21 – 23.