

Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера

И.А.АЛЕНИЧЕВ¹, Р.А.РАХМАНОВ² 

¹ ООО «Полюс Проект», Красноярск, Россия

² Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Аленичев И.А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера / И.А.Аленичев, Р.А.Рахманов // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 334-341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2

Аннотация. Минимизация сброса взорванной горной массы в выработанное пространство карьера является весьма актуальным направлением для изучения, так как позволяет повысить технологичность работ и сократить затраты на ведение добычи. В статье представлены результаты опытно-промышленных взрывов, в ходе которых проводилось исследование данного вопроса. Основная цель работ заключалась в установлении ключевых факторов, влияющих на объем сброса горной массы на транспортную берму карьера. В ходе проведения анализа мирового опыта исследований по данной теме выделены ключевые факторы, влияющие на формирование раз渲а и сброса – природные и технологические. Описана методика проведения экспериментов и сбора данных для анализа влияния технологических параметров размещения, заряжания и инициирования скважин на объемы сброса горной массы. Установлено, что основной сброс на транспортную берму карьера формируется объемом горной массы, ограниченным призмой угла естественного откоса. При достаточном смещении горной массы от края верхней бровки в сторону центра блока в формировании сброса участвуют только скважины 1-го и 2-го рядов. Получены эмпирические зависимости суммарного объема сброса горной массы от длины блока по бровке, удельного расхода ВВ, размера куска породы P_{50} и темпа отбойки. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования параметров БВР, а также для прогнозирования и оценки возможных последствий массового взрыва в схожих горно-геологических условиях.

Ключевые слова: массовый взрыв; транспортная берма; удельный расход ВВ; диаметр скважин; темп отбойки; гранулометрический состав; сброс горной массы

Введение. Ключевым результатом производства буровзрывных работ (БВР) на карьерах является формирование раз渲а отбитой горной массы требуемого качества дробления. В зависимости от горно-геологических условий добычи и технологии горных работ к раз渲у предъявляются определенные требования по геометрическим параметрам (высота, ширина, длина). Геометрические параметры раз渲а оказывают существенное влияние на последующие технологические операции и безопасность горных работ [5, 9].

При большой длине и ширине раз渲а отбитая горная масса ложится сравнительно тонким слоем на значительной площадке уступа. При этом, если взорванный блок представлен горной массой, включающей рудные и породные участки (рис.1, а), то происходят смещения в контурах рудных тел, что сказывается на показателях качества добываемого полезного ископаемого [4, 11].

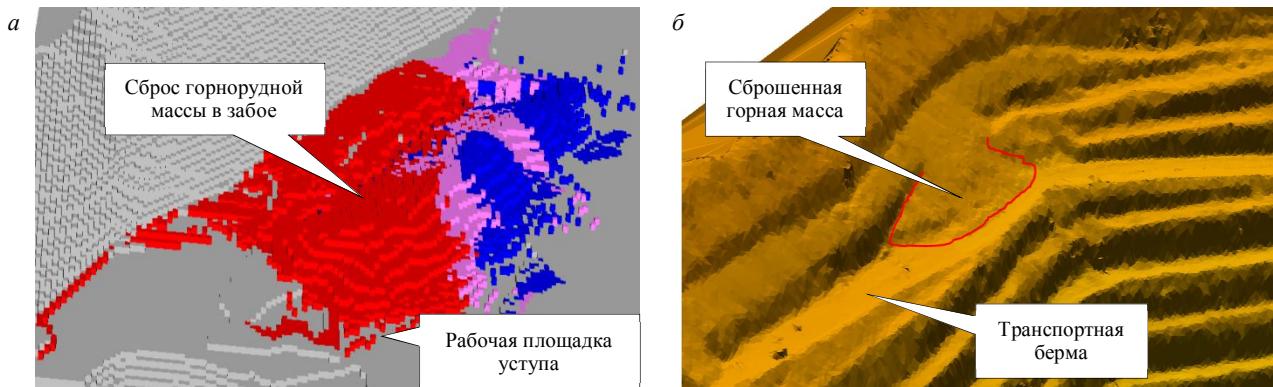


Рис. 1. Последствия сброса горной массы взрывом в карьере.
БВР-блок на площадке уступа (а) и над транспортной бермой (б)

На широких развалах снижается производительность экскаваторов и автосамосвалов при погрузке горной массы [3, 5, 8]. Требуется отвлечение техники на зачистку рабочей площадки. В таких производственных условиях возникают ограничения по размещению оборудования и ухудшаются технико-экономические показатели работы предприятия. При отбойке блоков над транспортной или улавливающей бермой объем сброшенной горной массы частично, а иногда и полностью, перекрывает их (рис.1, б). В связи с этим увеличивается время простоя горно-транспортного оборудования, связанное с расчисткой проездов. К тому же требуется привлечение дополнительной техники для расчистки сброса. Засыпка улавливающих берм в некоторых случаях, когда доступ к бермам по объективным причинам отсутствует, влияет на уровень безопасности горных работ на нижних горизонтах карьера. Описанные последствия от сброса горной массы ухудшают технологию добычи и требуют дополнительных затрат на производство горных работ.

Вопросы уменьшения ширины развала и минимизации объемов сброса на транспортную и улавливающую бермы карьера весьма актуальны для изучения. Понимание причин происхождения сброса, экспериментальное определение и выявление основных факторов, влияющих на ширину развала и объемы сброса горной массы, поможет инженеру БВР в дальнейшем управлять параметрами БВР и позволит свести к минимуму время простоя горно-транспортного оборудования, повысит производительность выемочной техники и улучшит безопасность горных работ.

Методика проведения экспериментов. Анализ мирового опыта по изучению и управлению параметрами развала отбитой горной массы позволил выделить ключевые факторы, влияющие на формирование развала и сброса. Условно их можно разделить на два класса [1, 2, 6, 7, 10, 12-17]: природные – исходные параметры взываемого массива горных пород; технологические – определяют способ и средства воздействия на массив.

К природным факторам относятся характеристики массива горных пород (физико-механические свойства пород, направление трещиноватости, размер отдельности в массиве, тектонические нарушения и т.д.). Технологические факторы определяются в зависимости от природных и могут быть представлены несколькими подразделами. К первому относятся параметры размещения заряда в массиве (диаметр и высота заряда, сетка бурения, тип взрывчатого вещества (ВВ), которые определяют удельный расход ВВ. К второму можно отнести последовательность и направление инициирования скважинных зарядов ВВ. Они зависят от типа применяемых средств инициирования и геометрии взываемого блока.

В данной работе на примере горно-геологических условий карьера «Восточный» Олимпиадинского ГОКа выполнена оценка влияния технологических параметров БВР на объемы сброса горной массы на свободную поверхность взываемого блока со стороны выработанного пространства карьера (рис.2). Для эксперимента был подобран участок в карьере, исключающий влияние подпорной стенки на параметры развала. Во всех взрывах исследовался 15-метровый верхний подступ 30-метрового откоса уступа с углом откоса 60°. Взываемые блоки были сложены карбонат-кварц-слюдистыми породами с крепостью 7-15 по шкале Протодьяконова и II-III категорией пород по трещиноватости.

Оценивались следующие параметры: удельный расход ВВ, диаметр скважин, конструкция заряда, схема монтажа взрывной сети, количество свободных поверхностей. Для определения влияний каждого из них на объемы сброса горной массы была разработана программа испытаний, которая включала проведение ряда экспериментальных взрывов блоков над транспортной

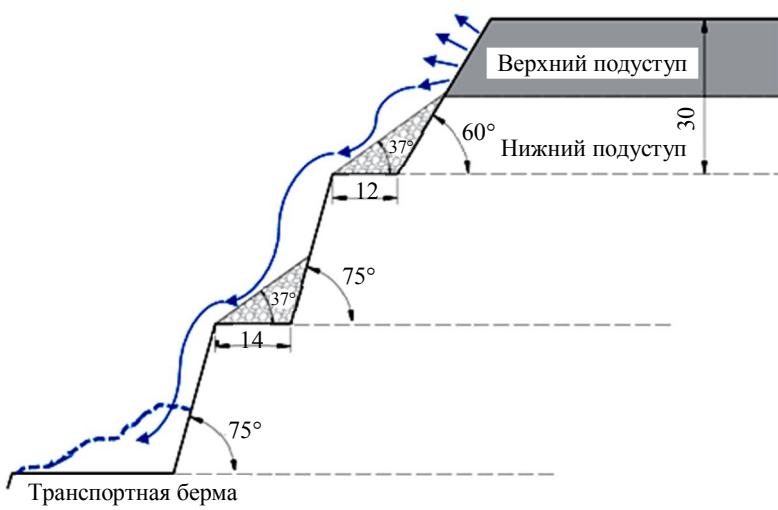


Рис.2. Схема проведения экспериментальных взрывов

бермой и установление взаимосвязи объемов сброса от различных технологических параметров взрывания. Учет объемов сброса велся маркшейдерскими замерами до и после взрыва.

Всего в ходе проведения экспериментальных работ произведено девять массовых взрывов (табл.1). Далее строились и анализировались эмпирические зависимости объема сброса на единицу длины от технологических параметров взрывания. Применялось эмульсионное ВВ «Эмулит» марки ВЭТ-700. Удельный расход ВВ принимался, исходя из апробированного практикой опыта ведения БВР, и изменялся на участках приконтурной зоны.

Таблица 1

Сводная таблица по экспериментальным взрывам

Взрыв	$L_{\text{блок}}, \text{м}$	$V_{\text{сбр}}, \text{м}^3$	$V_i, \text{м}^3/\text{м}$	$q, \text{кг}/\text{м}^3$		$B_r, \text{мс}/\text{м}$			Средний кусок, мм	Тип СИ
				Участок 1	Участок 2	1-й и 2-й ряды	2-й и 3-й ряды	3-й и 4-й ряды		
1	80	6617	83	1,776	1,569	32	32	25	253	НСИ
2	130	13945	107	1,671	1,573	23	29	17	141	НСИ
3	107	9165	86	1,598	1,516	32	22	21	181	НСИ
4	130	9394	72	1,468	1,229	44	23	21	196	ЭСИ
5	60	6863	114	1,830	1,580	21	21	21	-	НСИ
6	95	5370	57	1,282	1,290	31	37	28	240	ЭСИ
7	90	8387	93	1,476	1,398	25	17	19	129	НСИ
8	60	4922	82	1,664	1,418	34	25	18	202	НСИ
9	100	9438	94	1,177	1,329	43	34	29	198	ЭСИ

Для уменьшения объемов сброса по 1-му и 2-му рядам размещались скважины малого диаметра (рис.3), основные скважины по 1-му ряду рассредотачивались воздушным промежутком. В качестве эксперимента для определения влияния большого диаметра скважин на объем сброса на двух взрывах по 2-му ряду располагались скважины диаметром 311,1 мм. По линии 1-го ряда бурились наклонные скважины, которые заряжались на 50 % от основного заряда. На всех взрывах применялась врубовая схема инициирования скважин с расположением контрольного ряда в районе центра блока. Диагонали располагались в форме клина, либо трапеции с апробированными на предприятии замедлениями для достижения оптимального качества дробления, темп отбойки изменялся на уровне 15-20 мс/м. Темп отбойки для крайних трех рядов изменялся вариативно, исходя из применявшихся систем инициирования (СИ) – неэлектрических (НСИ Рионель) или электронных (ЭСИ DaveyTronic) (табл.1). Применение двух типов СИ позволило отработать различные интервалы замедлений. При этом НСИ применялись с традиционно апробированными схемами взрывания, а ЭСИ применялись на участках, где производилось увеличение темпа отбойки между рядами с целью исключения вероятного подбоя скважинных зарядов.

По каждому массовому взрыву отслеживались и анализировались следующие данные:

- Длина блока по бровке $L_{\text{блок}}$ – участок, где присутствовал сброс горной массы.
- Объем сброса горной массы $V_{\text{сбр}}$ – определялся маркшейдерской службой карьера.
- Объем сброса на единицу длины V_i – количественная характеристика для оценки влияния различных параметров, равная отношению суммарного объема сброса к длине блока по бровке.

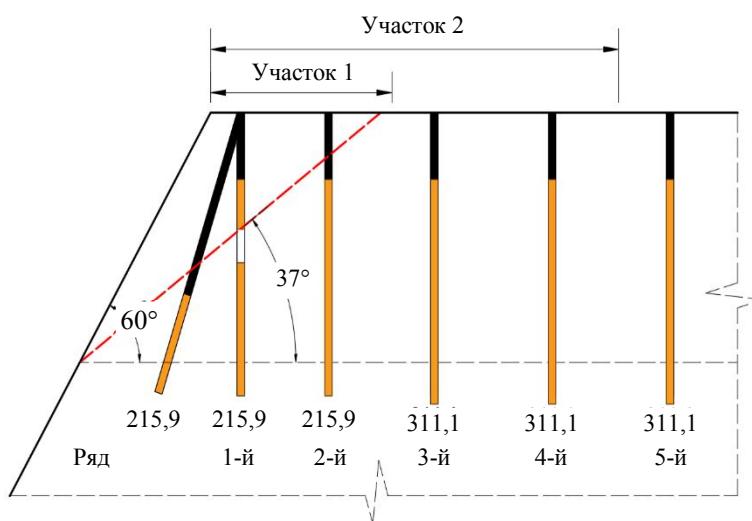
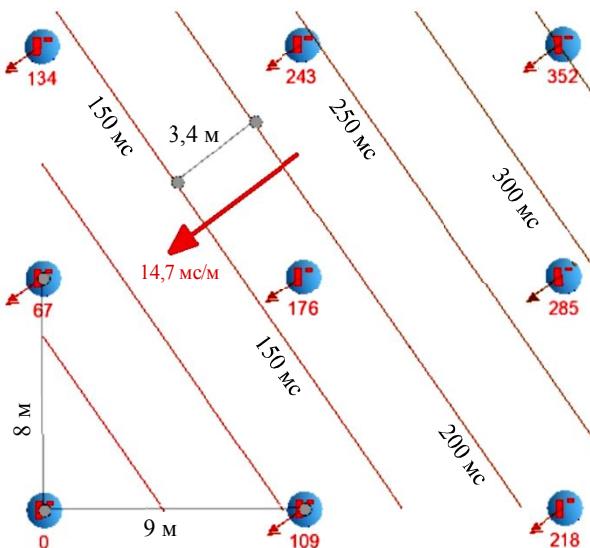


Рис.3. Схема к расчету удельного расхода ВВ для различных участков



Вектор направления темпа отбойки

$$B_r = \frac{(200-150)}{3,4} = 14,7 \text{ мс/м}$$

Вектор направления темпа отбойки перпендикулярен изолиниям времени замедления.

Рис.4. Схема к расчету темпа отбойки

- Удельный расход ВВ q – рассчитывался для двух участков на блоке (рис.3): участок 1 – объем массива, ограниченный по верху призмой угла естественного откоса для скальных горных пород; участок 2 – объем массива, включающий как скважины малого диаметра (215,9 мм), так и большого диаметра (311,1 мм). Разделение по участкам делалось, чтобы понять, влияет ли средний в целом по блоку удельный расход ВВ на объем сброса, или все-таки в формировании сброса участвует 1-й и часть 2-го ряда.

- Темп отбойки между рядами B_r – время распространения фронта взрывной отбойки в 1 м массива, рассчитывался как отношение разности значений соседних временных изолиний схемы монтажа взрыва к кратчайшему расстоянию между ними (рис.4). В экспериментах учитывался темп отбойки для первых трех рядов, а именно между рядами 1-2, 2-3 и 3-4.

- Распределение среднего куска. На всех взрывах производились измерения гранулометрического состава прибором PortaMetrics. Далее строился кумулятивный график распределения кусков породы на исследуемом блоке и оценивался характерный средний размер куска, соответствующий 50 % всего объема кусков породы (P_{50}).

Обработка и обсуждение результатов. Объемы сброса на единицу длины составили 57-114 м³/м (табл.1). Если вернуться к рис.3 и оценить объем призмы, ограниченной углом естественного откоса с учетом коэффициента разрыхления 1,5 (эмпирический средний коэффициент, выведенный на производстве), то получится среднее значение 127 м³/м. Сравнивая это значение с объемом фактического сброса на единицу длины, можно заключить, что основной сброс горной массы в взываемом блоке формируется именно объемом, ограниченным призмой угла естественного откоса. Таким образом, при достаточном смещении горной массы в сторону центра блока в формировании сброса участвуют только скважины 1-го и 2-го рядов.

На рис.5, а представлен график эмпирической зависимости объема сброса от удельных расходов ВВ, рассчитанных для участков 1 и 2 (см. рис.3). Коэффициент детерминации для участка 1 выше (0,62 относительно 0,58), чем на участке 2. Данный факт подтверждает приоритет формирования сброса за счет скважин 1-го и 2-го рядов.

На взрыве № 2 и № 5 по второму ряду размещались скважины диаметрами 311,1 мм. При прочих равных условиях данное расположение скважин привело к завышенному объему сброса (107 и 114 м³/м соответственно) относительно остальных взрывов. На остальных блоках скважины диаметром 311,1 мм размещались, начиная с 3-го ряда. Данная схема не увеличивала объемы сброса и может быть рекомендована как оптимально достаточная для минимизации сброса.

На рис.5, б представлена зависимость объема сброса от размера куска породы P_{50} . Отметим, что присутствует определенная зависимость этих двух параметров – чем меньше размер куска породы, тем больше объем сброса. Невысокая корреляция говорит о том, что учитывался именно

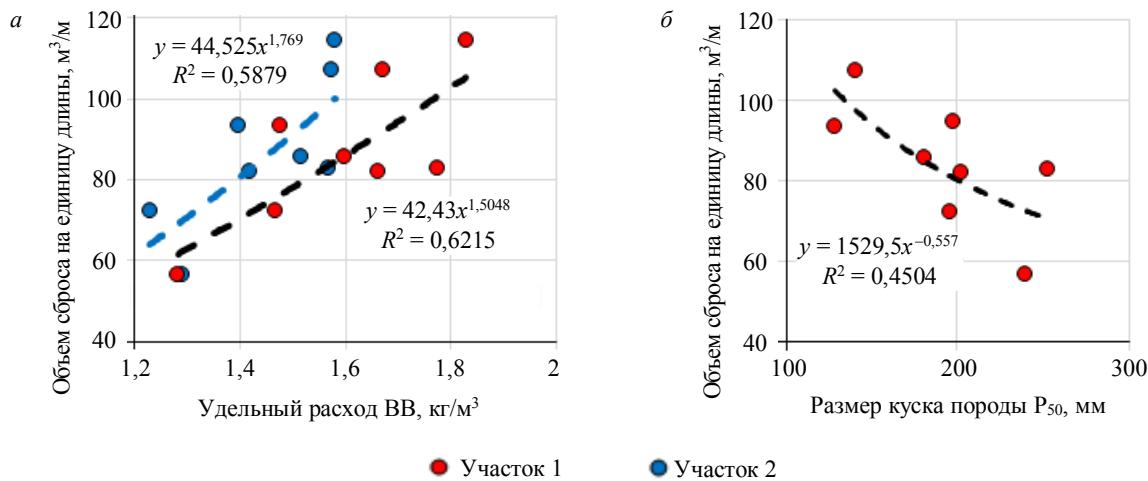


Рис.5. Зависимость объема сброса на единицу длины от удельного расхода ВВ (а) и среднего размера куска породы P₅₀ (б)

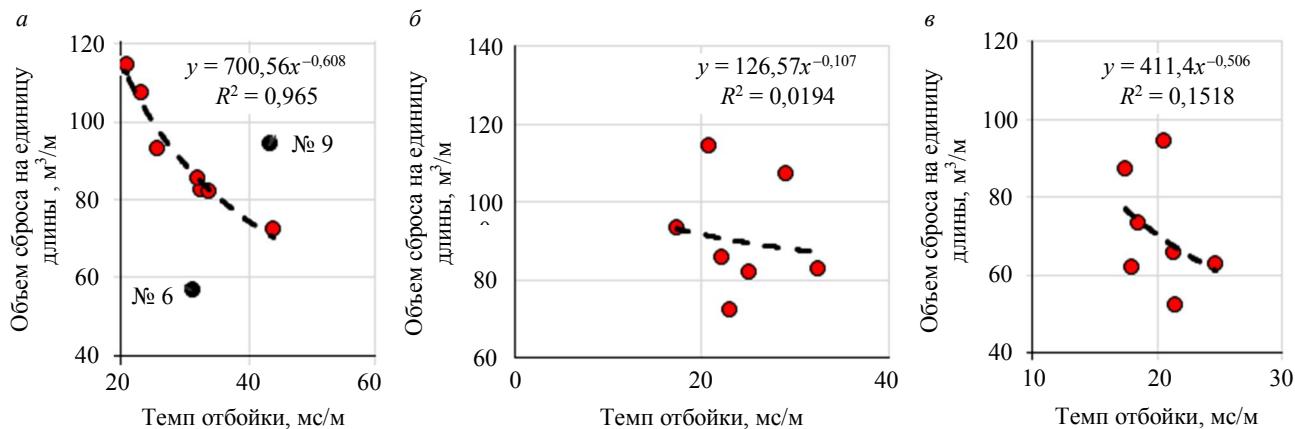


Рис.6. Зависимость объема сброса на единицу длины от темпа отбойки между 1-м и 2-м рядами (а), 2-м и 3-м рядами (б), 3-м и 4-м рядами (в)

средний гранулометрический состав без привязки к объемам сброшенной горной массы (гранулометрический состав сброса не измерялся). Полученная корреляция по гранулометрическому составу связана напрямую с удельным расходом ВВ и темпом отбойки.

На рис.6 представлены полученные эмпирические зависимости объема сброса на единицу длины от темпа отбойки между рядами 1-2, 2-3 и 3-4. Высокий коэффициент детерминации (0,96) отмечен для темпа отбойки между 1-м и 2-м рядами, чего нельзя сказать об остальных участках, где корреляционной зависимости не выявлено, из чего следует, что от замедления (задержки) 1-го ряда напрямую зависит объем сброса. Данный факт подтверждает ранее выдвинутое положение об приоритетном формировании сброса за счет скважин 1-го и 2-го рядов.

Следует обратить внимание на особенности, выявленные при проведении взрывов № 6 и № 9 (рис.6, *a*). Самый минимальный объем сброса 57 м³/м зафиксирован на взрыве № 6. Анализируя параметры взрыва, нужно отметить кардинальное отличие в сравнении с остальными взрывами. Оно заключалось в наличии дополнительной (третьей) свободной поверхности с противоположной стороны от откоса уступа, которая была сформирована экскаватором в процессе отгрузки ранее взорванной горной массы. Данный взрыв имел вид узкой полосы шириной 30 и длиной 100 м, фактически отбойка велась в сторону выработанного экскаватором пространства. За счет этого достигнута минимизация объема сброса (точка имеет самый нижний уровень по сбросам на графике).

На блоке № 9 зафиксирован высокий объем сброса – 94 м³/м, хотя удельный расход ВВ был невысоким, а темп отбойки увеличенным в сравнении с остальными блоками (табл.1). При

производстве данного взрыва была апробирована схема с рассредоточением 1-го и 2-го рядов (на остальных блоках рассредотачивался только 1-й ряд). Полагаем, что так как 2-й ряд был рассредоточен, его должного смещения к центру блока достигнуто не было, большая часть объема отбитой горной массы со 2-го ряда сместились в меньшей степени из-за наличия воздушного промежутка и меньшей массы заряда. При этом создался подпор и для 1-го ряда, который под действием энергии взрыва в зажатой среде, созданной 2-м рядом, а также под действием силы тяжести под углом естественного откоса скатился на транспортную берму.

По результатам проведенного анализа можно утверждать, что основными технологическими параметрами взрывания, влияющими на объемы сброса горной массы, являются: удельный расход ВВ, приходящийся на первые два ряда скважин от бровки, и темп отбойки между 1-м и 2-м рядами. Безусловно, эти два параметра оказывают комплексное действие (в большей мере на сброс влияет удельный расход ВВ и темп отбойки), поэтому, имеет смысл определить общую зависимость для этих двух параметров и убрать неопределенность в оценке приоритета действия каждого из них.

Поскольку удельный расход ВВ с объемом сброса имеет прямую зависимость, а темп отбойки обратную, построим эмпирическую зависимость объема сброса на единицу длины V_i от параметра q/B_r (рис.7).

Коэффициент детерминации полученной зависимости составил 0,93. Полученный ранее небольшой коэффициент детерминации для удельного расхода ВВ полностью компенсировался темпом отбойки, что еще раз подтверждает корректность приведенных рассуждений. Таким образом, параметр объема сброса на единицу длины является функцией от объема сброса и длины блока по бровке и может быть представлен эмпирической зависимостью:

$$\frac{V_{\text{сбр}}}{L_{\text{блок}}} = 382 \sqrt{\frac{q}{B_r}}. \quad (1)$$

Выразим объем сброса:

$$V_{\text{сбр}} = 382 L_{\text{блок}} \sqrt{\frac{q}{B_r}}, \quad (2)$$

где $L_{\text{блок}}$ – длина блока по бровке, м; q – удельный расход ВВ для 1-го и 2-го рядов, кг/м³; B_r – темп отбойки между 1-м и 2-м рядами, мс/м (с учетом выдерживания темпа отбойки между рядами 2-3 и 3-4 в пределах 20-30 мс/м).

Полученная зависимость может быть использована на производстве при прогнозных расчетах суммарного объема сброса от различных технологических параметров. Например, произведем сравнительный расчет прогнозного объема сброса горной массы для трех условий взрывания:

1. Базовый, применяемый вариант ($L_{\text{блок}} = 100$ м, $q = 1,2$ кг/м³, $B_r = 20$ мс/м).
2. Удельный расход ВВ снижен на 10%, а темп отбойки увеличен на 30 мс/м относительно базового варианта ($L_{\text{блок}} = 100$ м, $q = 1,1$ кг/м³, $B_r = 50$ мс/м).
3. Удельный расход ВВ снижен на 20%, а темп отбойки увеличен на 50 мс/м относительно базового варианта ($L_{\text{блок}} = 100$ м, $q = 1,0$ кг/м³, $B_r = 70$ мс/м).

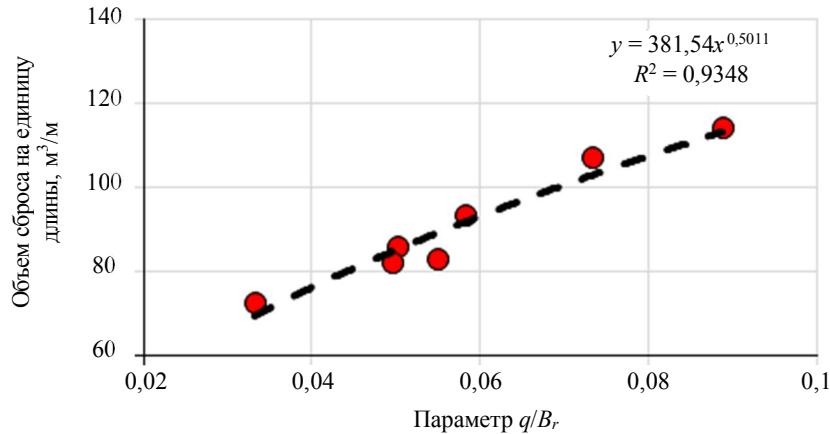


Рис.7. Зависимость объема сброса от отношения удельного расхода ВВ к темпу отбойки для участка первых двух рядов

Таблица 2

Сравнительная таблица расчета суммарного объема сброса

Вариант	$L_{\text{блок}}$, м	q , кг/м ³	B_r , мс/м	$V_{\text{сбр}}$, м ³	Снижение, %
1		1,2	20	9357	Базовый
2	100	1,1	50	5666	39
3		1,0	70	4566	51

Результаты расчетов (табл.2) наглядно показывают, что при изменении двух основных технологических показателей объем сброса может быть сокращен практически в два раза в сравнении с базовым вариантом. Следует отметить, что с учетом снижения удельного расхода ВВ и увеличения темпа отбойки вероятно получение неудовлетворительного качества дробления породы (в условиях проведенных экспериментов было получено хорошее качество). При снижении удельного расхода ВВ снижается энергия дробления заряда, а при увеличении темпа отбойки увеличивается вероятность повреждения (подбоя) близ расположенных и разновременно взрываемых зарядов ВВ. Поэтому параметры БВР должны подбираться опытно-промышленными взрывами с учетом конкретных горно-геологических условий и с учетом требований к качеству взрыва. Полученная эмпирическая зависимость (2) позволяет производить подбор граничных параметров БВР без учета требований к критерию качества взрыва. Вопрос взаимной увязки качества БВР и объема сброса планируются к исследованию опытно-промышленными взрывами дополнительно, в том числе с наработкой более представительной статистики (в том числе и на других карьерах) по приведенным в данной статье методикам и зависимостям.

Заключение. Проведен комплекс опытно-промышленных взрывов блоков на свободную поверхность над транспортной бермой. Цель проведения работ – установление технологических критериев, влияющих на объемы сброса горной массы в горно-геологических условиях действующего карьера. На основе экспериментальных работ получена эмпирическая зависимость для определения объема сброса от параметров удельного расхода ВВ, темпа отбойки и длины блока вдоль бровки. Установлены важные аспекты, которые могут быть применены инженерами БВР при проектировании массового взрыва для минимизации объемов сброса горной массы на транспортную берму:

1. Оптимальное количество рядов скважин малого диаметра (215,9 мм) по бровке с учетом минимизации сброса – два ряда. Размещение на втором ряду скважин большого диаметра (311,1 мм) привело к увеличению объема сброса на 32 % в сравнении с диаметром 215,9 мм.

2. Рассредоточение второго ряда наряду с первым привело к увеличению объема сброса на 30% в сравнении с рассредоточением только одного первого ряда.

3. Дополнительная (третья) свободная поверхность, образованная экскаватором с противоположной стороны от откоса уступа, снизила объем сброса на 32% в сравнении с вариантом с двумя свободными поверхностями (т.е. без опережающей выгрузки части блока).

Полученные результаты могут использоваться на производстве при проектировании массовых взрывов над транспортной бермой для оценки возможных последствий и внесения оперативных корректировок в проект БВР. Направления дальнейших исследований в рамках освещенной тематики будут направлены на получение большего количества замеров с учетом изучения зависимостей сброса от природных факторов, а также наличия подпорной стенки при отработке нижнего подступа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агаронян Г.А. Моделирование процесса перемещения и формирования развала взорванной горной массы при взрыве в трещиноватой среде / Г.А.Агаронян, А.Г. Агаронян // Вестник Национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование. 2018. № 1 (21). С. 84-95.
2. Аленичев И.А. Корректировка удельного расхода взрывчатого вещества с учетом обводненности апатит-нефелиновых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 364-373.
3. Блинов А.Н. Закономерности формирования структуры развала горной массы при взрывных работах на карьерах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук. 2001. 24 с.

4. Кабелко С.Г. Верификация компьютерной технологии прогнозирования раз渲а взорванной горной массы в карьерах / С.Г.Кабелко, В.А.Дунаев, А.В.Герасимов // Маркшейдерия и недропользование. 2016. № 3 (83). С. 62-65.
5. Копылов С.В. Метод определения параметров раз渲а отбитой горной массы на карьерах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, 2005. 22 с.
6. Лаптев Ю.В. Компьютерное моделирование раз渲а горной массы при селективной разработке / Ю.В.Лаптев, В.Д.Кантемиров, А.М.Яковлев // Альманах современной науки и образования. 2014. № 5-6 (84). С. 92-96.
7. Парамонов Г.П. Прогнозирование параметров раз渲а горной массы при производстве взрывных работ / Г.П.Парамонов, В.В.Лисевич // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4 (46). С. 100-103. DOI: 10.18454/IRJ.2016.46.025
8. Ракишев Б.Р. Модели раз渲а пород на уступах при различных технологиях взрывных работ // Записки Горного института. 2007. Т. 171. С. 39-44.
9. Рождественский В.Н. Исследование способов управления шириной раз渲а при взрывании скальных пород на карьерах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, 1997. 27 с.
10. Brent G.F. Throw blasting analysis / G.F.Brent, M.J.Noy // Proceedings Eighth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 7-11 May 2006, Santiago, Chile. P. 717-722.
11. Blast Monitoring and Blast Translation – Case Study of a Grade Improvement Project at the Fimiston Pit, Kalgoorlie, Western Australia / M.Fitzgerald, S.York, D.Cooke, D.Thornton // Eighth International Mining Geology Conference, 22-24 August, 2011, Queenstown, New Zealand. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2011. P. 285-297.
12. Choudhary B.S. Firing patterns and its effect on muck pile shape parameters and fragmentation in quarry blasts // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013. Vol. 2. Iss. 9. P. 32-45.
13. Esen S. Muck pile shaping for draglines and dozers at surface coalmines / S.Esen, M.Nagarajan // 11th International symposium on rock fragmentation by blasting, 24-26 August, 2015, Sydney, Australia. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015. P. 1-8.
14. Isheyskiy V. Combination of fracturing areas after blasting column charges during destruction of rocks / V.Isheyskiy, M.Marinin, V.Dolzhikov // International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12. № 12. P. 2953-2956.
15. Paul S. Factors governing the muck pile characteristics / S.Paul, C.David // 43rd annual conference on explosives and blasting techniques, 29 January – 1 February, 2017. Orlando, Florida, USA. URL: <https://www.researchgate.net/publication/314506218> (дата обращения: 10.04.2020)
16. Rai P. Blast design for controlled augmentation of muck pile throw and drop / P.Rai, H.Yang // Tunnel and Underground Space. 2010. Vol. 20. Iss. 5. P. 360-368.
17. Sastry V. Fragmentation and throw due to blasting – Role of initiation systems / V.Sastry, R.Chander // Proceedings 36th International conference on explosives and blasting, Los Angeles, USA, 2008. P. 371-376.

Авторы: И.А.Аленичев, канд. техн. наук, ведущий инженер, *AlenichevIA@polyusgold.com*, <http://orcid.org/0000-0003-3359-4450> (ООО «Полюс Проект», Красноярск, Россия), Р.А.Рахманов, канд. техн. наук, научный сотрудник, *Ruslan1250@mail.ru*, <http://orcid.org/0000-0002-5341-2274> (Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.06.2020.

Статья принята к публикации 29.03.2021.