УДК 622.235

Е.Б.ШЕВКУН, А.В.ЛЕЩИНСКИЙ Н.К.ЛУКАШЕВИЧ
Тихоокеанский государственный университет,
Хабаровск, *Россия*

ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА МАССИВ

Проанализирован комплекс мероприятий для увеличения времени воздействия взрыва на горный массив. Приведены результаты экспериментальных взрывов с различными типами забоек. Выявлено, что применение специальной запирающей забойки совместно с формированием воздушных промежутков внутри заряда и под забойкой повышает качество дробления при одновременном снижении расхода ВВ.

The analysis of a complex of measures for time increase of an explosion performance to mountain range is made. The outcomes of experimental explosions with various types of tamping are given. Is revealed, that the special locking tamping use together with shaping of air gaps inside a charge and under tamping increases quality of crushing and decreases explosive substances use.

Известно, что в физическом процессе разрушения горной породы взрывом энергия затрачивается на образование новой поверхности, поэтому наибольшие затраты энергии приходятся на зону пластичных деформаций вблизи заряда с разрушением породы до тонкодисперсного состояния смятием и раздавливанием под действием короткой ударной волны напряжений. Существенное увеличение полезной работы взрыва возможно за счет уменьшения размеров этой зоны и увеличения размеров области воздействия на горную породу расширяющейся газовой полости с продуктами взрыва, играющей основную роль при формировании зоны видимых разрушений путем трещинообразования [15]. Такой результат может быть достигнут одновременным увеличением времени воздействия взрыва на массив, снижением «пика» давления и усилением взаимодействия ударных волн напряжения в массиве горных пород.

Анализ выполненных за последние десятилетия теоретических и экспериментальных исследований показывает, что такой комплекс воздействий на массив горных пород может быть достигнут только при одновременном использовании прочной забойки, запирающей в зарядной полости продукты взрыва до момента разрушения взрываемой среды, и воздушных промежутков как внутри скважинных зарядов, так и между зарядом ВВ и забойкой.

Длительными исследованиями различных авторов установлено, что забойка играет существенную роль в работе взрыва: обеспечивает полноту детонации ВВ и тем самым выделение наибольшего количества энергии взрыва заряда данного размера; увеличивает продолжительность импульса взрыва и, следовательно, степень использования энергии взрыва, а также предотвращает опасный разброс кусков породы, выносимых газами взрыва в процессе их истечения через устье скважины. Рациональная длина забойки зависит от многих факторов, характеризующих свойства ВВ и забоечного материала, конструкцию заряда, а также среду, в которой производится взрыв.

Тем не менее, продолжаются дискуссии о целесообразности забойки вообще, поскольку Единые правила безопасности при взрывных работах дают право руководителю предприятия устанавливать допустимость взрывания зарядов без забойки (гл.IV, п.24) и многие предприятия, в том числе крупные, ведут взрывные работы без забойки. В работе В.А.Фокина [12] приведены результаты взрывов с нижним инициированием зарядов ВВ, согласно которым отсутст-

вие забойки незначительно изменяет показатели взрыва. В то же время в работе В.П.Буровцева [2] подчеркивается, что объективной мотивации для отказа от применения забойки нет, потому что помимо сокращения ударных воздушных волн и дальности разлета кусков взорванной породы применение забойки улучшает качество дробления и сокращает выброс вредных газообразных продуктов взрыва в атмосферу. Необходимость применения забойки базируется на фундаментальных принципах, определяющих эффективность и безопасность взрывных работ, поэтому забойку следует рассматривать как важнейшее звено в управлении действием взрыва.

Эту же мысль более четырех десятилетий назад отстаивал Г.П.Демидюк. Он показал [3], что соблюдение принципа максимального заполнения взрывчатым веществом выбуренного объема скважины при сплошном цилиндрическом заряде приводит к созданию излишка энергии ВВ в верхней части уступа и, как следствие, к отрицанию необходимости забойки. В подтверждение приводятся даже эксперименты, специально поставленные в производственных условиях: отсутствие забойки не ухудшает результаты взрывания. Это действительно может иметь место, если энергия заряда ВВ превышает действительно необходимую. Тезис Г.П.Демидюка об излишке энергии заряда ВВ подтвержден в работе [11] исследованиями влияния длины забойки на степень дробления горной массы взрывом скважинных зарядов в алевролитах с коэффициентом крепости $f = 4$ при диаметре скважин 150 мм, высоте уступа 9 м, глубине скважин 10 м и сетке скважин 4,5 × 5 м. При удельном расходе ВВ свыше 0,3 кг/м^3 забойка на дальность разлета кусков существенного влияния не оказывает. При удельном расходе ВВ менее 0,3 кг/м^3 взрывание скважин с забойкой значительно уменьшает радиус разлета кусков по сравнению с взрыванием без забойки. Ширина развала и проработка подошвы уступа при взрывании с забойкой и без нее практически одинаковы при заряде ВВ в скважине от 50 до 80 кг. Когда же заряд скважины был уменьшен до 40 кг, отсутствие забойки отрицательно сказалось на дроблении массива: на уровне подошвы уступа появились пороги (в скважинах с полной забойкой пороги при взрывании образовывались при заряде ВВ массой 30 кг). Ухудшение дробления породы при взрывании без забойки объясняется преждевременным прорывом значительных объемов газов взрывчатого превращения в атмосферу.

Это очень важное и с современной точки зрения соображение, ибо в той же работе [12] описаны взрывы эмульсионными ВВ с высокой энергетикой в единице объема и автором не приведено данных об отсутствии превышений против необходимого значения.

Все большее число предприятий начинает возвращаться к применению зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками, когда нижняя часть заряда инициируется снизу, а верхняя – сверху. И в этих условиях необходимость забойки уже не оспаривается, поэтому целесообразно подробнее рассмотреть влияние как забойки, так и воздушных промежутков на полезное использование энергии взрыва на дробление горных пород.

После прохождения волны напряжений и формирования зон дробления и трещинообразования в окружающей взрывную полость породе действуют напряжения, обусловленные все еще достаточно высоким давлением продуктов детонации. Уровень их ниже, чем в волне напряжений, но и прочность породы после прохождения волны напряжений снижается из-за появления дополнительных трещин и увеличения размеров имеющихся.

В работе [10] были рассчитаны зоны разрушения на волновой стадии и дополнительного трещинообразования на квазистатической стадии для взрыва заряда граммонита 30/70 диаметром 220 мм в граните. Радиус дробления равен 6 радиусам заряда – 0,65 м, радиус зоны трещинообразования равен 26,5 радиусам заряда – 2,92 м. Исходя из условия, что забойка не вылетает в течение всего времени подрастания трещин t, были рассчитаны размеры увеличения зоны трещинообразования от начальной длины трещин $l_{\text{òð}}^{\text{í}}$ до конечной $l_{\text{òð}}^{\text{ê}}$, а также рас-

стояние от оси заряда, на котором заканчивается рост трещины $r_{тр}$:

$l^{н}_{зб}$, м	$l^{в}_{зб}$, м	$r_{тр}$, м	$\Delta l_{тр}$, м	t, мс
0,4	1,2	3,72	0,8	1,3
0,6	1,9	4,22	1,3	2,1
0,8	2,2	4,32	1,4	2,5
1,0	2,6	4,52	1,6	3,0
1,3	3,1	4,72	1,8	3,7
1,6	3,57	4,89	1,97	4,3
1,8	4,03	5,05	2,13	4,8
2,0	4,15	5,07	2,15	5,1
2,1	4,3	5,12	2,2	5,3
2,27	4,54	5,19	2,27	5,7

Как следует из расчетов, возможно заметное увеличение зоны трещинообразования только за счет концентрации напряжений в вершинах трещин в поле напряжений, обусловленных высокими давлениями продуктов взрыва. Время, необходимое для подрастания трещин, может быть обеспечено применением обычных или специальных забоек.

Наличие забойки и воздушного промежутка под ней оказывает положительное влияние на дробление среды, уменьшая выход негабарита. Установлено, что воздушный промежуток между зарядом ВВ и забойкой позволяет перераспределить энергию взрыва и увеличить период действия взрыва на массив на 15-35 %, значительно сократить размер забойки (а также потребность в забоечном материале и трудоемкость процесса забойки), уменьшить выход негабаритных фракций и диаметр среднего куска по сравнению с взрыванием без воздушного промежутка [4]. Наилучшее дробление обеспечивается применением укороченной засыпной забойки и воздушного промежутка между нею и зарядом, наихудшее – при взрывании без забойки.

Авторы работы [11] считают, что максимальная длина забойки не должна превышать 32 диаметров скважины – улучшения взрыва нет; минимальная длина забойки равна 16 диаметрам скважины – при дальнейшем уменьшении растет разлет кусков горной массы и падает качество дробления. В то же время экспериментальные исследования на объемных моделях из канифоли показали, что наибольшие напряжения распространяются в среде при наличии укороченной забойки из крупнозернистого материала с рассредоточенным воздушным промежутком зарядом, поэтому при ведении взрывных работ длина забойки более 10 диаметров заряда нецелесообразна. Производственными экспериментами подтверждено, что уменьшение длины забойки до семи диаметров заряда не снижает эффективность взрывания [6].

В работе [5] в качестве специальной забойки предложено газодинамическое запирающее устройство (ЗГДУ), изменяющее режим истечения продуктов детонации через устье шпура или скважины и представляющее собой цилиндр, изготовленный из пластического материала с осевым каналом, имеющим двухконический профиль. Часть энергии взрыва, уходящая через устье при отсутствии забойки, задерживается в полости взрыва и участвует в процессах нагружения массива в квазистатической стадии. Эксперименты проводили в породах с коэффициентом крепости $f = 3 \div 4$ на скважинах диаметром 95 мм с зарядом гранулотола массой 9,5 кг. Заряды взрывали по три одновременно: без забойки, с забойкой породной мелочью и с ЗГДУ. Зона разрушающего действия взрыва при использовании ЗГДУ увеличивается на 30-40 %, что позволяет уменьшить объемы бурения на 12 % и расход ВВ на 25 %.

Идеальной будет такая забойка, которая будет разрушаться или вылетать из скважины одновременно с разрушением взрываемого массива. Тогда можно утверждать, что она полностью выполнила свое назначение. Проведенные в работе [8] опыты по забойке из бетона на гипсоглиноземистом расширяющемся цементе показали существенное (в 29 раз) увеличение объема взрывной полости шпуровых зарядов.

В связи с таким большим разбросом мнений о длине и материале забойки нами проведен эксперимент с укороченной забойкой из бетона и металла и воздушным промежутком под нею в скважинах диаметром 115 мм, пробуренных в гранодиоритах XII категории крепости по СНиП [13]. Скважи-

ны располагали в первом ряду и взрывали одновременно.

Масса заряда в скважинах 1, 2 и 3 составила по 100 кг, в скважинах 4 и 5 – по 90 кг граммонита 79/21. В скважине 1 установили цементно-песчаную забойку на расширяющемся быстротвердеющем цементе длиной 0,8 м состава 1:3 (цемент : песок) при водоцементном отношении 0,3. Время выдержки цементно-песчаной забойки до взрыва составило 3,5 ч. Под забойкой оставался воздушный промежуток длиной 3,7 м.

В скважине 2 выполнили обычно применяемую на карьере сплошную забойку из бурового шлама длиной 5 м.

В скважине 3 разместили металлическую запирающую забойку длиной 0,7 м с предварительным распором ее в стенки скважины двумя конусами в верхней и нижней разрезных частях корпуса. Под забойкой оставался воздушный промежуток длиной 3,6 м.

Заряд в скважине 4 выполнен без забойки для фиксирования момента взрыва серии скважин на видеопленке.

В скважине 5 установили на глубине 1,5 м металлическую распорную забойку с одним распорным конусом в нижней части, подтягиваемым в разрезной корпус канатиком через натяжное устройство. Под забойкой оставался воздушный промежуток длиной 2,5 м.

Видеосъемку взрыва осуществляли цифровой видеокамерой NV-GS11 с 24 кратным оптическим увеличением с расстояния 700 м (за пределами опасной зоны взрыва).

После детонации заряда ВВ происходит динамический удар продуктов детонации с давлением в десятки тысяч атмосфер по нижнему распорному конусу. За счет его большой величины воспринимаемое усилие значительно, что приводит к дополнительному вдавливанию конуса в нижнее коническое расширение корпуса и заклиниванию металлической забойки в скважине.

Покадровая видеограмма взрыва показала, что через 40 мс произошел выброс обеих металлических забоек из скважин: четко видны столбы выброса продуктов детонации и начало разрушения цементно-песчаной забойки (характерный рыжеватый столб выброса). Через 160 мс разрушение цементно-песчаной забойки завершилось, и виден четкий столб выброса продуктов детонации, сравнявшийся по высоте с выбросом из скважины 4, в которой забойки не было. Этот же кадр зафиксировал начало прорыва газов в верхней части уступа в сторону откоса через массив горных пород толщиной 2,5-3,0 м и вспучивание верхней части уступа. Это можно считать началом процесса разрушения уступа в его верхней части в районе скважин 1 и 3-5. При этом следует учесть, что нижняя часть забойки располагалась в скважине 1; 3 и 5 на глубине соответственно 0,8; 0,7 и 1,5 м. Поэтому разрушение горной породы и началось в районе устья скважин (со стороны наименьшего сопротивления) при очень высоком давлении продуктов детонации (они еще не прорвались через горную породу в районе откоса уступа). На следующих кадрах видно, что от скважин 3-5 идет вспучивание откоса уступа и начинается быстрый выброс взрываемого объема. Плотное запирание газов взрыва в скважинах 3 и 5 и частичное разрушение верхней части уступа у скважины 4 обеспечило динамичное развитие взрыва в правой части. Это можно объяснить существенным увеличением зарядной полости по объему и влиянием запирания газов взрыва металлическими забойками вплоть до разрушения массива горных пород в районе устьев скважин 3 и 5. В районе скважины 2 с забойкой длиной 5 м из бурового шлама таких процессов не наблюдается.

Фрагменты разрушенных металлических забоек, собранные после взрыва, позволяют сделать вывод о том, что они были выброшены из скважин после разрушения горной породы в районе устья скважин: на корпусах металлических забоек нет следов скольжения по скважине. Распорные конусы под очень большим давлением вошли внутрь корпусов забоек с тонкими стенками (5 мм) и пронзили их насквозь, вдавливая в смятые породы стенок скважин. Цилиндрический корпус запирающей забойки лопнул по всей длине, у распорной забойки были оборваны лепестки наружного корпуса.

Длина забойки из бурового шлама 5 м исключила воздействие заряда скважины 2 на верхнюю часть уступа – только у скважины 2 видны крупные камни в верхней части уступа. В то же время в районе скважины 1 отмечается более мелкое дробление горной массы, чем у других скважин.

Таким образом, металлические распорные забойки выдерживают давление газов взрыва зарядов ВВ массой 90-100 кг без скольжения по скважине вплоть до разрушения окружающих их горных пород. Укороченная до 7-14 диаметров заряда забойка с воздушным промежутком под нею позволяет качественно проработать верхнюю часть уступа и повысить степень дробления пород в целом.

Метод скважинных зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками, дает возможность значительно повысить полезную работу взрыва; при этом достигается более равномерное и мелкое дробление скальных горных пород; размер среднего куска уменьшается в 1,5-2 раза. Выход негабарита снижается от двух до десяти раз, а в некоторых случаях полностью исключается. Наблюдалось очень много случаев снижения расхода ВВ при одновременном улучшении результатов взрыва [9]. Воздушный промежуток увеличивает длину скважины, на которую непосредственно воздействует заряд (до 70 %), так как взрывные газы оказывают давление на стенки скважины и на участке воздушного промежутка. Происходит перераспределение энергии взрыва. Уменьшается доля энергии, затрачиваемой на бесполезное переизмельчение породы вокруг скважины в результате бризантного действия ВВ. Значительно уменьшается объем работ по забойке скважин за счет уменьшения длины забиваемой части скважин.

Установлено, что применение воздушных промежутков по мере даже незначительного увеличения высоты заряда в скважине резко увеличивает способность преодоления ЛСПП по сравнению со сплошными зарядами. Объем породы, обрушаемый скважиной с воздушным промежутком, значительно больше, чем у сплошных зарядов [7]. Объясняется это тем, что при взрывании зарядов с воздушными промежутками образуется газовая полость заметно большего объема, чем при применении сплошного заряда. Объем же разрушенной породы должен быть пропорционален объему газовой камеры. Перекачка энергии взрыва из продуктов детонации в ударную волну происходит именно в процессе расширения продуктов взрыва, поэтому, чем больше объем газовой камеры, тем относительно большая часть энергии переходит в ударную волну и тем, следовательно, больше при прочих равных условиях объем разрушенной породы [1].

Нами проведено три экспериментальных взрыва с воздушными промежутками из пенополистирола плотностью 15-20 кг/м^3, содержащего в гранулах до 98 % воздуха [14]. Заряд ВВ комбинированный – в нижней, обводненной, части скважин размещали водоустойчивый граммонит 30/70, далее – неводоустойчивый граммонит 79/21. На экспериментальном участке заряды рассредоточивали двумя воздушными промежутками: метровый расположен в заряде ВВ и промежуток длиной 1,2-1,7 м (в зависимости от длины скважины, остающейся под забойку) располагали под забойкой из бурового шлама. Средняя масса заряда в скважинах на экспериментальном участке составила 80 кг, на контрольном участке – 106 кг.

Видеограмма записи взрыва показала, что прорыв газов через откос уступа на контрольном участке начинается раньше, чем на экспериментальном; падение горной массы на подошву уступа на экспериментальном участке произошло через 1960 мс от начала взрыва, а на контрольном участке – через 2400 мс, т.е. с задержкой почти в полсекунды за счет большей высоты выброса. Из этих данных можно сделать вывод о более длительной задержке газов в скважинах экспериментального участка и более «мягком» действии взрыва в них. После отработки блока на экспериментальном участке отмечено качественное дробление горной массы, завышений подошвы нет. Аналогичные результаты получены по двум другим взрывам с воздушными промежутками из пенополистирола. Выполнение воздушного про-

межутка из вспененного полистирола при ручной зарядке технологично: происходит такая же засыпка из мерной емкости или мешка, как и для ВВ.

Применение конструкции зарядов с рассредоточением их по высоте воздушными промежутками из вспененного полистирола обеспечило более мягкое действие взрыва с увеличенной задержкой времени действия продуктов детонации и меньшей высотой выброса забойки из скважин и горной массы. Удельный расход ВВ снижен с 0,98 до 0,74 кг/м^3 при сохранении качества дробления.

Таким образом, специальная укороченная забойка, запирающая продукты взрыва до разрушения массива горных пород, совместно с применением воздушных промежутков внутри заряда и под забойкой позволяет существенно увеличить длительность запирания продуктов взрыва и повысить качество дробления при одновременном снижении расхода ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баум Ф.А.* К вопросу оценки эффективности действия взрыва зарядов с воздушными промежутками // Взрывное дело. 1964. № 54/11. С.48-52.

2. *Буровцов В.П.* Физико-технические обоснования параметров забойки и оценка ее роли в управлении действием взрыва скважинных зарядов на карьерах / В.П.Буровцов, В.П.Тарасенко // Проблемы взрывного дела: Сб. статей и докладов. М.: Изд-во МГГУ. 2002. № 1. С.5-9.

3. *Демидюк Г.П.* К вопросу управления действием взрыва скважинных зарядов // Взрывное дело. 1964. № 54/11. С.174-184.

4. *Друкованый М.Ф.* К вопросу о влиянии величины забойки на качество дробления горных пород взрывом в карьерах / М.Ф.Друкованый, В.М.Комир, И.А.Семенюк // Взрывное дело. 1966. № 59/16. С.166-177.

5. Исследование эффективности применения газодинамических запирающих устройств в качестве забойки скважинных зарядов / Г.П.Парамонов, М.Г.Менжулин, Ю.А.Миронов, А.Н.Шишов // Взрывное дело. 1998. № 91/48. С.214-221.

6. *Комир В.М.* Экспериментальные исследования влияния укороченной забойки на результаты взрыва / В.М.Комир, И.А.Семенюк, И.Ф.Петряшин // Взрывное дело. 1971. № 70/27. С.279-285.

7. *Кривошлык И.Р.* Выбор рациональной конструкции заряда на Всеволодо-Вильвенском карьере / И.Р.Кривошлык, М.И.Рудник, Г.С.Коркунов // Взрывное дело. 1963. № 51/8. С.159-169.

8. *Легастаев Е.Г.* Исследование влияния расширяющейся забойки шпуров на результаты взрыва // Взрывное дело. 1966. № 59/16. С.262-266.

9. *Марченко Л.Н.* Методические указания по применению скважинных зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками на открытых горных разработках / Л.Н.Марченко, В.С.Кудряшов // Взрывное дело. 1963. № 51/8. С.199-206.

10. Метод расчета дополнительного разрушения горных пород на квазистатической стадии действия взрыва / М.Г.Менжулин, Г.П.Парамонов, Ю.А.Миронов, А.В.Юровских // Записки Горного института. 2001. Т.148. Часть 1. С.138-142.

11. *Сумин И.П.* Исследование влияния длины забойки на степень дробления горной массы взрывом скважинных зарядов / И.П.Сумин, П.А.Гордеев, В.В.Зольников // Взрывное дело. 1964. № 54/11. С.185-189.

12. *Фокин В.А.* Развитие теории проектирования буровзрывных работ на предельном контуре карьера: Автореф. дис … д-ра техн. наук. Апатиты, 2005. 45 с.

13. *Шевкун Е.Б.* Скважинные заряды с укороченной забойкой / Е.Б.Шевкун, А.В.Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 4. С.139-146.

14. *Шевкун Е.Б.* Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом / Е.Б.Шевкун, А.В.Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 5. С.116-123.

15. *Шемякин Е.И.* О разрушении горных пород в ближней зоне подземного взрыва / Е.И.Шемякин, А.Н.Кочанов // Взрывное дело. 1999. № 92/49. С.7-19.