

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.274:622.235

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОЙ ОТБОЙКИ С УЧЕТОМ ВРЕМЕНИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНОГО ИМПУЛЬСА

Т. Кабетенов, Х. А. Юсупов, С. Т. Рустемов

*Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева,
E-mail: kabetenov_t@ntu.kz, ул. Сатпаева, 22, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан*

Разработана схема расчета параметров буровзрывных работ (БВР) для скважинной отбойки, основанная на конструкции скважинного заряда с недозарядом в верхней его части. При расчете учитывалось время действия взрывного импульса, обусловленного истечением газов продуктов детонации. Получены соотношения, определяющие рациональные параметры БВР, которые при сохранении качества дробления минимизируют расходы на бурение.

Взрывные работы, отбойка, взрыв, диаметр шпура и скважины, шпуровая и скважинная отбойка

Известен способ отбойки горных пород [1], включающий бурение, зарядание ВВ и взрывание шпуровых зарядов с линией наименьшего сопротивления (далее ЛНС), определяемой по формуле

$$W = d \sqrt{\frac{0.785 \Delta k_3}{m q}}, \quad (1)$$

где d — диаметр шпура, м; Δ — плотность заряжания, кг/м³; k_3 — коэффициент заполнения шпура (по “Единым правилам безопасности” $k_3 = 0.6 - 0.72$); m — коэффициент сближения зарядов; q — удельный расход ВВ, кг/м³.

В работе [2] ЛНС изменяется в диапазоне от 1.0 до 10.0 м, такие ее значения могут быть использованы для большинства горных пород. За основу расчетов при уступном взрывании принята формула Лангефорса:

$$B_{\max} = \frac{d}{33} \sqrt{\frac{\rho s}{c f (S/B)}}, \quad (2)$$

где B_{\max} — максимальная величина ЛНС, м; d — диаметр донной части взрывной скважины, мм; ρ — плотность заряжания, кг/дм³; s — относительная энергия взрывчатого вещества (Эмулит 150); c — эталонная взрываемость породы, кг/м³; f — степень наклона скважины ($f = 1.0$ — для вертикальных скважин и 0.95 — для скважин с наклоном 3:1); S/B — отношение расстояния между зарядами к ЛНС.

В работах [3, 4] приводится формула японского исследователя Кумао Хино, который на основе теории дробления породы отраженной волной, предлагает определять ЛНС так:

$$W = \frac{0.5r_0 P_d}{\sigma_{\text{раст}}}, \quad (3)$$

где r_0 — радиус заряда, м; P_d — давление детонации ВВ; $\sigma_{\text{раст}}$ — предел прочности пород на растяжение.

Число отколовшихся кусков оценивается формулой

$$N = \frac{P_d}{\sigma_{\text{раст}}}, \quad (4)$$

толщина отколовшегося слоя —

$$d_{\text{сл}} = \frac{W}{N}. \quad (5)$$

Коэффициент сближения скважин определяется как

$$m = 2\sqrt{2^{2/(n+2)}}, \quad (6)$$

где n — показатель, определяющий степень падения давления на фронте волны по мере ее распространения в зависимости от расстояния.

В работе [5] при известных горно-геологических и горнотехнических условиях ЛНС предлагается рассчитывать по формуле

$$W = W_{\text{ст}} \left(1 + \frac{1}{32} \lg \frac{L}{L_0} \right), \quad (7)$$

где $W_{\text{ст}}$ — стандартная величина ЛНС при известной длине скважины (шпура), равная $L_0 = d \cdot 100$ м, d — диаметр скважины (шпура), м; L — длина шпура (скважины), м.

Однако формулы из работ [1–5] обладают одним общим недостатком, заключающимся в отсутствии учета продолжительности времени действия импульса взрыва и времени распространения разрушения по массиву от точки инициирования. Это может приводить, например в случае коротких зарядов, к неэффективному использованию энергии взрыва ВВ. При этом не полностью прорабатываются основания уступа, увеличивается выход некондиционных кусков горных пород или увеличиваются затраты на бурение.

Для оценки влияния продолжительности времени действия импульса взрыва и времени разрушения массива на показатели БВР необходимо разработать методику расчета эффективных параметров БВР, в частности ЛНС, обеспечивающую полноту отбойки полезных ископаемых, снижающую сейсмическое воздействие взрыва на окружающий массив, улучшающую устойчивость кровли выработок и оставляемых целиков с учетом времени действия импульса взрыва и времени разрушения массива.

В [6] утверждается, что на результаты взрыва удлиненных зарядов существенное влияние оказывает длина заряда, а именно: увеличение длины заряда до какой-то определенной величины улучшает качество дробления разрушаемого массива и увеличивает объем образующейся взрывной воронки. Дальнейшее увеличение длины заряда никакого влияния на результаты взрыва не оказывает. Объясняется это влиянием истечения газов продуктов детонации из взрывной полости, которое уменьшает разрушающее действие коротких зарядов по сравнению с более длинными.

В работе [7] по результатам многочисленных производственных взрывов показано, что при заданной величине диаметра шпура существует длина заряда $l_{\text{эф}}$, при которой степень дробления и удельный расход ВВ достигают оптимальных значений. В работе [8] также по результа-

там производственных взрывов с использованием различного диаметра скважин от 0.044 до 0.180 м показано, что для каждого диаметра скважин имеется вполне определенная рациональная сетка их расположения.

Для поиска рациональных параметров БВР необходимо разработать схему расчета ЛНС скважинного или шпурового заряда с учетом времени действия взрывного импульса, определяемого вытеканием газов продуктов детонации. Установлено [6], что на результаты взрыва оказывает влияние не только длина, но и место инициирования колонкового заряда — прямое, центральное, обратное.

В зависимости от принятой схемы инициирования удлиненного заряда время действия взрывного импульса в случае полного заполнения скважины в [9] предлагается определять по формулам:

$$t_p = \frac{l_z}{D}, \quad t_c = 2 \frac{0.5l_z}{D}, \quad t_o = 2 \frac{l_z}{D}, \quad (8)$$

где t_p , t_c , t_o — соответственно время действия взрывного импульса при прямом, центральном и обратном инициировании, с; l_z — длина заряда, м; D — скорость детонации ВВ, м/с.

Исходя из продолжительности действия взрывного импульса, волна напряжений в массиве распространяется по радиусу от точки инициирования на расстояния [9]:

$$R_{tp} = t_p c_p = \frac{l_z}{D} c_p, \quad (9)$$

$$R_{tc} = t_c c_p = \frac{l_z}{D} c_p, \quad (10)$$

$$R_{to} = t_o c_p = \frac{2l_z}{D} c_p, \quad (11)$$

где R_{tp} , R_{tc} , R_{to} — соответственно радиусы распространения волн напряжений в массиве за время действия взрывной нагрузки при прямом, центральном и обратном инициировании удлиненных зарядов, м; c_p — скорость распространения продольной волны в массиве, м/с.

В [9] по результатам анализа данных многочисленных экспериментальных взрывов показано, что предельно возможные размеры радиуса зоны трещинообразования достигаются, если за время действия взрывного импульса волна напряжений в массиве успевает охватить всю зону, в противном случае размеры этой зоны ограничиваются расстоянием, пройденным продольной волной. С учетом этого более эффективным является обратное инициирование. Отметим, что существующие в настоящее время средства взрывания “НОНЕЛЬ”, “ИСКРА” и другие позволяют осуществить такое инициирование заряда ВВ в шпурах (скважинах).

Тогда время действия взрывного импульса, согласно [9], определяется по формуле

$$t_o = 2 \frac{l_z}{D}. \quad (12)$$

Отсюда для коротких зарядов $W = 2l_z \frac{c_p}{D} = 2l_z \alpha$, где $\alpha = c_p / D$.

Линейный рост ЛНС с увеличением длины заряда продолжается до достижения предельной величины ЛНС длинного заряда, при котором истечение продуктов детонации не сказывается на разрушающем действии. По расчетам, приведенным в [10], влиянием истечения газов можно пренебречь для зарядов длиной больше $10 - 20d$ (d — диаметр заряда). Значения предельной величины ЛНС удлиненного заряда можно рассчитать по формулам (1)–(5) или по данным промышленных взрывов.

В результате многочисленных взрывов в производственных условиях на карьере “Ансай” АО “Ачполиметалл”, карьере “Алпыс” АО “Майкаинзолото” и карьере “Пустынный” ГРК “АБС Балхаш” в породах различной крепости отработана конструкция скважинного заряда, при которой незаряжаемая его часть равнялась ЛНС. Оптимальность такой конструкции зарядов отмечена также в [9]. При взрывании уступов на этих карьерах никаких отказов не наблюдалось и выход некондиционных кусков находился в пределах от 3 до 8 %, что является достаточно хорошим показателем.

Для таких зарядов ЛНС составляет

$$W = \sqrt{\frac{P(H + l_{\text{пер}} - l_{\text{заб}})}{qmH}}, \quad (13)$$

здесь P — количество ВВ, вмещающееся в 1 м скважины (шпура); $P = \pi(d^2/4)\rho$, кг/м, d — диаметр скважины, м, ρ — плотность заряжания, кг/м³; H — высота уступа, м; $l_{\text{пер}}$ — перебур скважин, м; $l_{\text{заб}}$ — длина забойки, м; q — удельный расход ВВ, кг/м³; m — коэффициент сближения зарядов скважин.

Принимая $l_{\text{пер}} = 0$, $m = 1$ и подставляя в (13) вместо H и $l_{\text{заб}}$ соответственно длину скважин l_c и W , получим:

$$W = \sqrt{\frac{P(l_c - W)}{ql_c}}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) значение P и решая соответствующее уравнение относительно W , имеем

$$W = \frac{-0.785d^2\rho + d\sqrt{0.785\rho(0.785\rho d^2 + 4ql_c^2)}}{2ql_c}. \quad (15)$$

Преобразуем это выражение к безразмерному виду относительно $\bar{W} = W/d$ и $\bar{l}_c = l_c/d$:

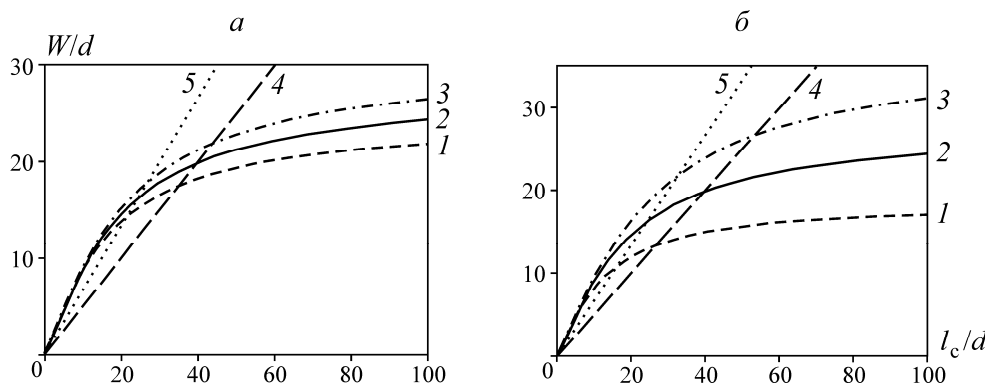
$$\bar{W}(\rho, q, \bar{l}_c) = \frac{-\bar{P} + \sqrt{\bar{P}^2 + 4q\bar{l}_c^2\bar{P}}}{2q\bar{l}_c}, \quad \bar{P} = \frac{\pi\rho}{4}. \quad (16)$$

Зависимости ЛНС от длины шпура или скважины, определяемые по формуле (16), при различных значениях плотности заряжания удлиненных зарядов и удельного расхода, обеспечивающего необходимое дробление, приведены на рисунке.

Общим в характере этих зависимостей является уменьшение ЛНС зарядов с уменьшением длины шпура или скважины. Данное уменьшение обеспечивает постоянство удельного расхода ВВ. При этом не учитывается возможное истечение газов продуктов детонации из шпура или скважины, которое уменьшает радиус зоны разрушения заряда. Расчет ЛНС для коротких зарядов проведем по методике работы [9] с использованием формул (10), (11). Примем, что размер ЛНС удлиненного заряда, взрывающегося около свободной поверхности, совпадает с радиусами распространения волн напряжений в массиве за время действия взрывной нагрузки R_{tp} , R_{tc} , R_{to} в случаях прямого, центрального и обратного инициирования зарядов. Так, для прямого и обратного инициирования для скважин длиной l_c с недозарядом, равным W , имеем:

$$l_c = l_z + R_{tp} = R_{tp} \left(\frac{D}{C_p} + 1 \right) \quad \text{и} \quad W = R_{tp} = l_c \frac{C_p}{C_p + D} = l_c \frac{\alpha}{1 + \alpha}, \quad (17)$$

$$l_c = l_z + R_{to} = R_{to} \left(\frac{D}{2C_p} + 1 \right) \quad \text{и} \quad W = R_{to} = l_c \frac{2C_p}{2C_p + D} = l_c \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha}. \quad (18)$$



Зависимость значений ЛНС от длины скважины: *а* — при $q = 0.9$ кг/м³ и $\rho = 700, 900, 1100$ кг/м³; *б* — при $\rho = 900$ кг/м³ и $q = 0.5, 0.9, 2.0$ кг/м³ (кривые 1–3 соответственно)

Для случая $C_p \approx D$: $W = 0.5l_c$ при прямом инициировании и $W = 0.667l_c$ при обратном. Эти зависимости показаны на рисунке прямыми 4, 5 соответственно. Из зависимостей (16)–(18), определяющих ЛНС шпуровых и скважинных зарядов, для каждого \bar{l}_c выбираем ту, которая дает меньшее значение, так как именно такое значение реализуется на практике [9]. Таким образом, зависимость ЛНС от длины заряда при заданных значениях плотности заряжения и удельного расхода на дробление состоит из прямолинейного участка (17), (18) при малых значениях длины заряда до точки пересечения с кривой, полученной по формуле (16), и этой кривой. Каждая точка этой зависимости определяет вариант проекта БВР для осуществления взрывной отбойки породы. Рациональным является проект, соответствующий указанной точке пересечения. Точки, лежащие на кривой (16) правее точки пересечения при заданной длине скважины или шпура, соответствуют проектам с меньшим диаметром заряда, что увеличивает расходы на бурение. Точки на прямом участке соответствуют большим диаметрам зарядов при неизменной ЛНС, что приводит к перерасходу ВВ.

Найдем координаты точек пересечения зависимостей (16)–(18). При заданном W значения длин скважины, определяемых парами зависимостей (16), (17) и (16)–(18), должны совпадать. Из (14) для первой пары, соответствующей случаю прямого инициирования, следует

$$\bar{l}_c^* = \frac{\bar{P}\bar{W}^*}{\bar{P} - q\bar{W}^{*2}} = \bar{W}^* \frac{1 + \alpha}{\alpha} = \beta_1 \bar{W}^*. \quad (19)$$

Для второй пары, соответствующей случаю обратного инициирования, имеем

$$\bar{l}_c^* = \frac{\bar{P}\bar{W}^*}{\bar{P} - q\bar{W}^{*2}} = \bar{W}^* \frac{1 + 2\alpha}{2\alpha} = \beta_2 \bar{W}^*. \quad (20)$$

При принятом значении $\alpha = 1$ для случая прямого инициирования зарядов $\beta_1 = 2$, для обратного $\beta_2 = 1.5$.

Решениями уравнений (19) и (20) относительно \bar{W} с учетом (16) является выражение $\bar{W}^* = \sqrt{[(\beta_i - 1)\pi\rho]/(4\beta_i q)}$, где $i = 1, 2$. Отсюда вторая координата точки пересечения $\bar{l}_c^* = \sqrt{[\beta_i(\beta_i - 1)\pi\rho]/(4q)}$.

В соответствии с изложенным параметры БВР (d, W) рационального проекта взрывной отбойки при заданных значениях плотности заряжения ρ , удельного расхода q и длины l_c скважин определяются формулами:

$$d = l_c \sqrt{\frac{4q}{\beta_i(\beta_i - 1)\pi\rho}}, \quad W = \frac{l_c}{\beta_i}. \quad (21)$$

Примеры расчетов по этим формулам приведены в табл. 1, 2. Расчеты проводились при значении плотности заряжения $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$. В табл. 1 представлены оптимальные диаметры скважин (шпуров) для различных значений длин скважин и удельного расхода ВВ при значении $\beta_1 = 2$, соответствующего прямому инициированию удлиненного заряда. В табл. 2 расчеты проводились при $\beta_2 = 1.5$ (обратное инициирование).

ТАБЛИЦА 1. Расчетные значения параметров БВР для скважин разной длины при прямом инициировании удлиненных зарядов, м

l_c	1	2	4	8	16
W	0.5	1	2	4	8
$d (q = 0.5 \text{ кг/м}^3)$	0.019	0.038	0.079	0.158	0.316
$d (q = 1.0 \text{ кг/м}^3)$	0.027	0.054	0.108	0.216	0.432
$d (q = 1.5 \text{ кг/м}^3)$	0.033	0.066	0.132	0.264	0.528
$d (q = 2.0 \text{ кг/м}^3)$	0.038	0.076	0.152	0.304	0.608

ТАБЛИЦА 2. Расчетные значения параметров БВР для скважин разной длины скважины при обратном инициировании удлиненных зарядов, м

l_c	1	2	4	8	16
W	0.67	1.33	2.67	5.3	10.7
$d (q = 0.5 \text{ кг/м}^3)$	0.031	0.062	0.12	0.25	0.49
$d (q = 1.0 \text{ кг/м}^3)$	0.043	0.087	0.17	0.35	0.7
$d (q = 1.5 \text{ кг/м}^3)$	0.053	0.106	0.21	0.43	0.85
$d (q = 2.0 \text{ кг/м}^3)$	0.062	0.123	0.25	0.49	0.98

Из приведенных данных видно, что при обратном инициировании ЛНС зарядов больше, что приводит к меньшим затратам на бурение.

Конечно, реальное выполнение проектов по данным табл. 1, 2 затруднено, так как бурение существующими станками скважин и шпуров обеспечивает ограниченный набор диаметров. При этом возникает вопрос, какой диаметр, ближайший к оптимальному, следует выбрать. Согласно рисунку, нужно выбирать меньший диаметр, поскольку выбор большего увеличивает не ЛНС, а расход ВВ относительно необходимого. Отметим также, что реализация проекта с большим диаметром заряда возможна при замене его группой сближенных зарядов меньшего диаметра. Такие заряды имеют широкое распространение при массовых взрывах в подземных условиях при добыче железных руд в Таштаголе и Шерегеше.

ВЫВОДЫ

Предложена схема расчета параметров БВР для отбойки горной породы скважинными зарядами с недозарядом в верхней его части. При расчете учитывается время действия взрывного импульса, обусловленного истечением газов продуктов детонации.

Получена аналитическая зависимость ЛНС удлиненных зарядов ВВ от длины и диаметра шпура (скважины), скорости детонации ВВ, скорости продольных волн в породном массиве, удельного расхода ВВ, обеспечивающего качественное дробление, плотности заряжания шпура и энергетических характеристик ВВ.

Среди всех возможных проектных решений производства взрывных работ, обеспечивающих качественное дробление, выделены проекты, при которых расходы на бурение минимизированы. Таким образом, возможно определение рациональных значений ЛНС скважинных (шпуровых) зарядов и их диаметра с учетом высоты уступа на открытых горных работах и средней длины скважин в веере при подземном способе отбойки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранов А. О.** Расчет параметров технологических процессов подземной добычи руд. — М.: Недра, 1985.
2. **Стиг Олофсон.** Прикладная технология взрывной отбойки для строительства и горной промышленности / под ред. Р. Б. Юна. — Жезказган, 2003.
3. **Демидюк Г. П.** Современные теоретические представления о действии взрыва в среде // Тезисы докладов и сообщений на научно-техническом совещании по буровзрывным работам. — М.: ИГД им. Скочинского, 1961.
4. **Фадеев А. Б.** Расчет скважинных зарядов с позиции волновой теории взрыва // Взрывное дело, № 55/12. — М.: Недра, 1964.
5. **Кабетенов Т.** Рациональные параметры скважинной отбойки при отработке маломощных рудных залежей Миргалимсайского месторождения, Алма-Ата // Комплексное использование минерального сырья. — 1990. — № 3.
6. **Миндели Э. О.** Разрушение горных пород. — М.: Недра, 1974.
7. **Тереньтев В. И.** Управление кусковатостью при поточной технологии добычи руды подземным способом. — М.: Наука, 1972.
8. **Дубынин Н. Г., Рябченко Е. П.** Отбойка руды зарядами скважин различного диаметра. — Новосибирск: Наука, 1972.
9. **Андриевский А. П.** Физико-техническое обоснование параметров разрушения горного массива взрывом удлиненных зарядов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск, 2009.
10. **Александрова Н. И., Шер Е. Н.** Влияние забойки на разрушение горных пород взрывом цилиндрического заряда // ФТПРПИ. — 1999. — № 5.

Поступила в редакцию 19/XII 2014