УДК 622.235

Г.М.КРЮКОВ
Московский государственный горный университет, Россия
В.Г.ВАРТАНОВ
ООО «СПИ «Гидроспецпроект», Москва, Россия

ДРОБЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И ФОРМИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ПРОХОДКЕ ПОДЗЕМНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Приведен теоретико-экспериментальный метод расчета зон дробления при взрыве зарядов взрывчатых веществ, выполнена оценка воздействия сейсмических волн на охраняемые объекты при проходке подземных выработок.

The theoretical-experimental method of calculation of zones of crushing is resulted at explosion of charges of explosives, the estimation of influence of seismic waves on protected objects is executed at carrying out underground developments.

Рассмотрим процесс взрывного дробления горных пород при проходке подземных параллельных выработок. Для определенности рассчитаем параметры БВР в известняке ($\rho_{ïð} = 2{,}4\cdot10^3$ кг/м^3; $Å = 4{,}5\cdot10^9$ Па; $\mu = 0{,}26$; $C_1 = 4{,}4\cdot10^3$ м/с; $C_2 = 2{,}64\cdot10^3$ м/с; $\sigma_{сж} = 0{,}5\cdot10^8$ Па; $\tau_{ñäâ} = 1{,}5\cdot10^7$ Па; $\sigma_{ðàñ} = 0{,}6\cdot10^7$ Па) при использовании шпуровых зарядов аммонита 6ЖВ ($d = 2\,a_0 = 42$ мм; $d_{çð} = 36$ мм; $\Delta = 1$ г/см^3; $D = 4{,}2$ км/с; $Ð_æ = 4{,}41\cdot10^9$ Па; $\gamma = 3{,}0$).

Общие соотношения. Модель воздействия взрыва шпурового заряда на породу описывается с использованием соотношений ФКСВ-теории* [1], по которой физика процессов нагружения и разрушения горной породы взрывом зарядов ПВВ имеет следующую последовательность:

1) распространение детонационной волны по заряду;

2) формирование и распространение взрывной волны по породе;

3) формирование радиальных перемещений частиц породы;

4) формирование квазистатических полей напряжений;

5) формирование процессов разрушения породы.

При этом установлено следующее:

- В известняке при взрыве шпурового заряда аммонита 6ЖВ генерируются не ударные, а упругие волны малой амплитуды, поскольку $V = Ð_æ / \rho_{ïð}\,Ñ_1 = 417{,}6$ м/с.
- В породе около зарядной полости очень быстро (~ 5 мкс) формируется квазистатическое напряженно-деформированное состояние со значительными растягивающими полярными напряжениями на поверхности этой полости.
- При описании процессов деформирования и разрушения горных пород взрывом шпуровых зарядов ПВВ можно пренебречь явлениями многократных суперпозиций ударных волн разряжения в продукте детонации (ПД), поскольку их скорость $W = \gamma D/(\gamma+1) = 3{,}15\cdot10^3$ м/с, а время распространения этих волн от поверхности шпура до оси не превышает 7 мкс. Это обстоятельство и позволяет рассчитывать уменьшение давления в данном сечении полости только вследствие ее расширения.
- Взрывная упругая волна, распространяющаяся по породе, практически полно-

* *Крюков Г.М.* Феноменологическая квазистатическо-волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ / Г.М.Крюков, Ю.В.Глазков // Горный информационно-аналитический бюллетень. М., 2003.

стью определяется действием на детонационную волну, распространяющуюся по зарядной полости.

• Длина фазы сжатия взрывной сейсмической волны при взрыве в горной породе мелкошпурового заряда ПВВ не более 0,5 м, а ее длительность не более 120 мкс.

• Параметры (амплитуда и длина) фазы сжатия взрывной сейсмической волны, формирующейся в породе при взрыве в ней реального удлиненного заряда, будут практически такими же, как и при камуфлетном взрыве такого же бесконечного заряда.

Для оценки напряженно-деформированного состояния породы при взрыве удлиненного заряда ПВВ использованы гипотеза плоских сечений и соотношения, описывающие это состояние в ней при взрыве аналогичного бесконечного заряда:

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{Đ_Æ}{k_3}(1-å^{-k_1k_3\tau})\left(\frac{\dot{a}_0}{r}\right)^2 - 0{,}5P_Æ å^{-k_1k_3\tau}\left(\frac{\dot{a}_0}{r}\right);$$

$$\sigma_{rr} = -\frac{Đ_Æ}{k_3}(1-å^{-k_1k_3\tau})\left(\frac{\dot{a}_0}{r}\right)^2 - P_Æ å^{-k_1k_3\tau}\left(\frac{\dot{a}_0}{r}\right);$$

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{\alpha\alpha} + \sigma_{rr});$$

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{âěí} = 0{,}5\sigma_{rr}^{âěí},\ \sigma_{rr}^{âěí} = Đ_Æ å^{-k_1k_3\tau}\left(\frac{\dot{a}_0}{r}\right),$$

где a_0 – радиус зарядной полости, м; $\tau = t(r-a_0)/C_1$ – локальное время нагружения породы в данном сечении заряда, с; r, α, z – цилиндрическая система координат с осью z, направленной по оси заряда;

$$k_1 = \frac{E}{a_0(1+\mu)\rho_{ïđ}\tilde{N}_1};\ k_3 = 1 + \frac{2\gamma Đ_Æ(1+\mu)}{Å}.$$

Давление в детонационной волне (ДВ) зарядной полости изменяется по закону

$$Đ = Đ_Æ\left(\frac{\rho}{\rho_Æ}\right)^\gamma;\ \frac{\rho}{\rho_Æ} = \left(\frac{\dot{a}_0}{\dot{a}}\right)^2\left[(1-\overline{\rho_k})(2-\bar{\delta})\right],$$

где $\rho_Æ = \Delta(\gamma+1)/\gamma$; $\rho_k = 8\Delta/9$; $\bar{\rho}_k = \rho_k/\rho_Æ$; δ – расстояние от точки инициирования до рассматриваемого сечения, м; $\bar{x} = x/l$; для ДВ соответствуют значения $1 \le x \le 2$, причем $\bar{x} = 2$ соответствует положению химпика ДВ в рассматриваемом сечении заряда.

Рациональные параметры размещения зарядов ПВВ на забое. Быстро сформировавшееся распределение напряжений около взорванного шпурового заряда вызывает практически одновременное (разница по времени их протекания в данном сечении заряда не превышает ~ 10 мкс) протекание трех процессов разрушения породы: формирование радиальных трещин с образованием клиновидных секторов, внешний радиус зоны (в метрах) $b_0 = a_0\sqrt{Đ_Æ/\sigma_{ñæ}}$; дробление клиновидных секторов, внешний радиус зоны $b_\tau = a_0\sqrt{Đ_Æ/2\tau_{ñäâ}}$; мелкодисперсного дробления пород, внешний радиус зоны $b_* = a_0\sqrt{Đ_Æ/\sigma_{ìä}}$, где

$$\sigma_{ìä} = 13[1 + 0{,}079(f-15) + 0{,}0019(f-15)^2]\cdot 10^8, \text{ Па};$$

f – крепость пород по М.М.Протодьяконову. При этом b_0 по сути дела является радиусом зоны регулируемого дробления. С учетом этих оценок разработана следующая схема размещения зарядов ПВВ на забое при взрывной проходке подземных выработок.

1. Размещение зарядов ПВВ во врубе. По термодинамическим параметрам ПВВ и свойствам породы рассчитывается параметр

$$W_3 = 2b_\tau = d_{çđ}D\sqrt{\Delta/(2(\gamma+1)\tau_{ñäâ})}\ (0{,}51 \text{ м}). \quad (1)$$

Врубовые шпуры располагаются на забое друг от друга на расстояниях $\dot{a}_{âđá} = (0{,}9 \div 1)W_3$, при этом будет обеспечиваться интенсивное дробление породы во врубе.

2. Размещение отбойных (вспомогательных) зарядов ПВВ на забое. Рассчитывается параметр

$$W_1 = 2b_0 = d_{çđ}D\sqrt{\Delta/((\gamma+1)\sigma_{đàñ})}\ (1{,}14 \text{ м}). \quad (2)$$

Расстояние между отбойными и отбойными и врубовыми шпурами $a_{отб} = b_{ìòá,\ âđá} = 0{,}9W_1$. Инициирование отбойных зарядов ПВВ должно осуществляться группами, причем инициирование первой груп-

пы этих зарядов должно быть выполнено с $\tau_{çì} > 70$ мс после инициирования врубовых зарядов. Каждая последующая группа отбойных зарядов инициируется с замедлением не менее чем в 10 мс по сравнению со временем инициирования предыдущей группы зарядов. В каждой группе заряды ПВВ инициируются через один, так что расстояние между одновременно инициируемыми зарядами $à_{çð} = 1{,}8W_1$, при этом наложение полей напряжений в этом случае не будет влиять на процесс разрушения пород взрывом каждого заряда.

3. Оконтуривающие заряды ПВВ. Эти заряды должны располагаться на расстоянии $b = W_1$ от отбойных. Расстояние между оконтуривающими зарядами $a_{êò} = (0{,}7 \div 0{,}8)W_1$. Инициирование зарядов в каждой группе должно быть строго одновременным (с разбросом менее 25 мкс).

Формирование взрывной сейсмической волны (ВСВ). Амплитуда ВСВ, формирующейся при одновременном взрыве комплекта шпуровых зарядов рассчитывается* по уточненному соотношению М.А.Садовского с использованием модели эквивалентного сосредоточенного заряда:

$$V = k_2 \frac{P_0}{Z_{ïð} + Z_{ÏÄ}} \frac{à_0}{r}, \qquad (3)$$

где $Ð_0 = (\gamma - 1)0{,}5\Delta Q$, $P_0 = 4{,}33 \cdot 10^9$ Па, $Z_{ïð} = \rho_{ïð} C_1$; $Z_{ÏÄ} = \Delta W$ – акустические жесткости породы и ПД соответственно.

Результаты опытно-промышленных взрывов. Летом 2002 г. были проведены два опытно-промышленных взрыва (19.06.2002 г. и 20.06.2002 г.) с оценкой сейсмического воздействия на рядом расположенную параллельную выработку при взрывной проходке подземного правого перегонного тоннеля (ППТ) московского метрополитена от станции «Киевская» до станции «Парк Победы» и располагающегося на расстоянии 4,5 м от существующего тоннеля пункта техосмотра подвижного состава (ПТОПС).

Паспорта БВР для двух опытных взрывов были разработаны с участием кафедры РГПВ МГГУ, при этом расстояние между шпурами не превышало 0,7 м.

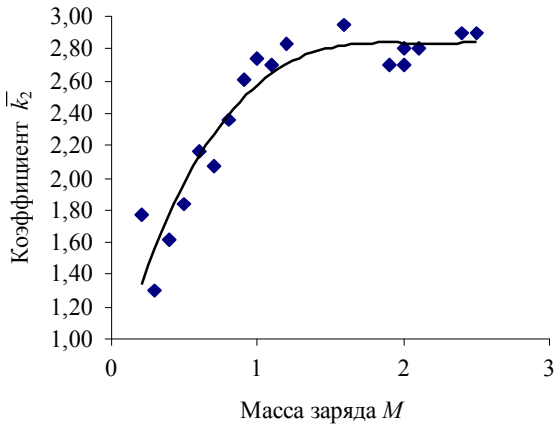
Оценка результатов взрывного дробления известняка показала, что горная масса состоит из двух больших фракций. В первой, составляющей до 65 % объема дробления породы, размер кусков не превышал 0,25 м. Вторая, оставшаяся часть горной массы, состояла из кусков 0,5-0,7 м. Эти результаты подтверждают достоверность рекомендованных параметров размещения зарядов ПВВ на забое, приведенных в пп.1-3. Значительный выход достаточно больших кусков породы обусловлен тем, что отбойные заряды в каждой группе замедления взрывались одновременно. Поскольку для них $a_{çð} < 0{,}8W_1$, то в каждой группе формировалась магистральная трещина по плоскости расположения зарядов, чем и был обусловлен выход крупных фракций во взорванной горной массе. При этом, как указано в п.2, для того, чтобы крупных кусков при этих взрывах не было, необходимо, чтобы инициирование отбойных зарядов в этих группах осуществлялось через один.

Оценка сейсмического воздействия на ПТОПС при описываемых взрывах осуществлялась путем измерения компонент скоростей частиц платформы тоннеля с использованием отечественной сертифицированной аппаратуры «Дельта-Геон», разработанной в ООО «Логис» (г.Жуковский, Московская область), и сейсмоприемником СК-1П. Запись сигналов этих колебаний осуществлялась на флеш-диск с объемом памяти 2 Гб и с ее последующим анализом на персональном компьютере.

Из выполненного анализа сейсмограмм следует, что в рассматриваемых опытах имеют место разные процессы формирования и распространения ВСВ от ППТ в сторону ПТОПС:

1. ВСВ не встречают преград (зон дробления пород взрывом) на своем пути в сторону ПТОПС. В этом случае рассчитанные значения среднего радиуса расположе-

* *Вартанов В.Г.* Рациональные параметры БВР при подземной проходке выработок в Московском регионе // Горный информационно-аналитический бюллетень. М., 2006. № 1.



Зависимость коэффициента от массы одновременно взрываемых зарядов

ния зарядов относительно ПТОПС соответствуют действительной длине пути этих волн к обделке ПТОПС.

2. Взрывы зарядов ППВ в некоторых ступенях замедлений происходят после образования между ними и ПТОПС зон разрушения пород. Поэтому распространение соответствующих ВСВ в сторону ПТОПС происходит не по прямой линии от этих зарядов к последнему, а по линии гораздо большей длины, огибающей указанные зоны дробления породы. Поэтому имеет место снижение амплитуды этих волн по сравнению с рассчитанной в предположении, что эти волны двигаются по прямой линии от зарядов к ПТОПС. В обоих опытах четко прослеживается существенное снижение коэффициента k_2, если между взрываемыми зарядами и ПТОПС формируется зона дробления пород взрывом зарядов в предыдущих ступенях замедления.

В широком диапазоне изменения значений $\overline{r} = r / l$ (где l – линейный размер соответствующего эквивалентного сосредоточенного заряда) коэффициент k_2 действительно не имеет функциональной связи с $\overline{r}$, что подтверждает достоверность предложенной модели (3) для закономерности изменения скорости частиц породы в ВСВ. Широкий диапазон значений коэффициента k_2 обусловлен влиянием на амплитуду ВСВ других факторов, главным из которых является масса одновременно взрываемых зарядов ПВВ.

На рисунке представлена функциональная зависимость $\overline{k_2}$ от массы одновременно взрываемых зарядов (M), монотонно возрастающая от $\overline{k_2} \cdot 10^3 \sim 1{,}4$ при $M = 0{,}2$ кг до $\overline{k_2} \cdot 10^3 = 2{,}85$ при $M = 1{,}2$ кг ($\overline{k_2}$ – среднее значение коэффициента для нескольких взрывов групп зарядов одной и той же массы). При этом для всех $Ì \geq 1{,}2$ кг этот коэффициент практически постоянен. Значения $\overline{k_2} \cdot 10^3 = 2{,}6 \div 2{,}94$ соответствуют взрывам зарядов аммонита 6ЖВ, инициируемых в первых группах ступенях замедлений, когда в породе практически еще не возникли макро- и микронарушенности, сформировавшиеся при взрывах зарядов аммонита 6ЖВ в предыдущих ступенях замедления.

Это обстоятельство – постоянство коэффициента k_2 от $\overline{r}$ при $M \geq 1{,}2$ кг – также свидетельствует о достоверности принятой модели (3) и позволяет понять физическую сущность распространения, затухания и воздействия взрывных сейсмических волн на ПТОПС.

Выводы

1. Достоверность разработанного на основе ФКСВ-теории рационального размещения зарядов на забое при проходке подземных выработок, подтверждена результатами опытно-промышленных взрывов.

2. Разработанная модель эквивалентного сосредоточенного заряда позволила установить закономерность формирования и распространения ВСВ на расстояниях $\overline{r} \geq 4$ м от забоя при взрывах комплектов зарядов ПВВ. Результаты расчетов амплитуды ВСВ по соответствующей формуле удовлетворительно согласуются с опытными данными.