Ж.Г.ДАМБАЕВ, А.В.ЗДИТОВЕЦКИЙ, В.Н.КОВАЛЕВСКИЙ
Санкт-Петербургский горный ин-т, Россия

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ ПРИ ВЗРЫВЕ СЕЛЕКТИВНО-ДЕТОНИРУЮЩИХ ЗАРЯДОВ ВВ

В нашей стране за последние 10-15 лет разработан новый тип ВВ и зарядов из них с необходимым комплексом энерго- и газовыделения. При взрыве этих зарядов в полной мере реализуются их метательные свойства, т.е. практически исключается бризантное воздействие на породу*. Освоено опытно-промышленное и промышленное производство этих зарядов, они успешно применяются на ряде блочных карьеров Ленинградской, Мурманской, Иркутской областей, в Республике Карелия и допущены Госгортехнадзором России к постоянному применению в горной промышленности. При взрыве этих зарядов обеспечивается взрывчатое превращение в форме взрывного горения во взрывной камере (шпуре, скважине), создается давление, значительно меньшее прочности породы на сжатие и в 1,2-1,5 раза большее прочности породы на разрыв; увеличивается время воздействия на стенки взрывной камеры газообразных продуктов взрыва (ПВ). Сотрудниками кафедры разрушения горных пород Санкт-Петербургского горного института совместно с сотрудниками СКТБ «Технолог» и НПО «Кристалл» разработаны специальные конструкции зарядов: заряды эластичные трубчатые (ЗЭТ «Гранилен») и заряды шланговые (ЗША).

Шланговые заряды ЗША состоят из полиэтиленовой оболочки диаметром 14 и 25 мм, гранулированной аммиачной селитры или аммонита АТ-1 и центрального инициатора – нитки детонирующего шнура (ДШ). При инициировании ДШ ударно-волновое воздействие от взрыва ДШ вызывает во взрывчатом веществе процесс взрывного горения. Толщина слоя ВВ, в котором ударная волна (УВ) может вызвать процесс взрывного горения, рассчитывается по начальным параметрам инициирующей УВ на основании законов распространения ударной волны по взрывчатому веществу с учетом критических условий воспламенения.

Время процесса в слое определяется временем распространения УВ на это расстояние, временем задержки воспламенения и средним временем сгорания диспергированных гранул аммиачной селитры.

Основными параметрами БВР при отделении блоков природного камня от массива взрывным способом являются диаметр (обычно 32-42 мм) и расстояние между шпурами (скважинами), их глубина, расстояние до свободной поверхности, т.е. ширина захвата монолита, тип ВВ, масса заряда, диаметр заряда.

Выбор оптимального расстояния между шпурами (скважинами) зависит от физико-механических свойств породы и от начальных параметров импульса взрыва: амплитуды начального давления во взрывной камере и времени действия установившегося квазистатического давления для завершения процесса формирования и роста трещины между шпурами по линии отделения монолита.

Параметры БВР при отбойке камнеблоков должны обеспечивать рост трещины между шпурами в плоскости откола при минимальных нарушениях околошпурового пространства. Для обеспечения процесса трещинообразования в массиве необходимо, чтобы давление ПВ было бы больше величины критического растягивающего напряжения горной породы, а для сохранности законтурного массива требуется, чтобы давление ПВ в зарядной камере не превышало предела прочности на сжатие. Это достигается выбором рационального расстояния между шпурами и оптимальных параметров импульса взрыва. Применение зарядов ЗША позволяет выполнить эти требования.

На примере ЗША рассмотрим расчет давления продуктов взрыва для комбинированного селективно-детонирующего заряда ВВ с целью определения оптимальных параметров БВР.

---

* *Дамбаев Ж.Г.* Управление энергией взрыва для направленного разрушения твердых тел / ВНИМИ. СПб, 1999.

Расчет давления ПВ производился с использованием уравнения состояния газов с вириальными коэффициентами, учитывающими зависимость коволюма от удельного объема газов V в форме Тейлора*:

$$P = \rho nRT\left[1+\left(\frac{b_2}{V}\right)+0{,}625\left(\frac{b_2}{V}\right)^2+0{,}287\left(\frac{b_2}{V}\right)^3+0{,}193\left(\frac{b_2}{V}\right)^4\right],$$

где b_2 – второй вириальный коэффициент, см^3/г; ρ – плотность продуктов детонации, г/см^3; R – молярная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура продуктов взрыва, К; n – число молей продуктов детонации; P – давление продуктов детонации, кгс/см^2.

Второй вириальный коэффициент b_2 рассчитывается суммированием величин b_2 для различных компонентов продуктов взрыва:

$$b_2 = \sum_{i=1}^{n} nb_i / n, \qquad (1)$$

где n_i – число молей i-го компонента в уравнении разложения продуктов взрыва.

Для различных продуктов взрыва приняты следующие значения b_2,см^3/г

ПВ	CO_2	H_2O	O_2	N_2
b_2	37	7,9	21	34

В единице массы заряда ВВ рассматриваемой конструкции содержится 93 % аммиачной селитры NH_4NO_3 и 7 % тэна $C_5H_8N_4O_{12}$:

$$930/80\ NH_4NO_3 + 70/316\ C_5H_8N_4O_{12} = C_{1,1}H_{48,3}N_{37,5}O_{24,1}.$$

Реакция разложения ВВ

$$C_{1,1}H_{48,3}N_{37,5}O_{24,1} = 1{,}1CO_2 + 24{,}1H_2O + 5{,}6O_2 + 12{,}1N_2$$

рассчитывалась по методу Авакяна. Кислородный баланс ВВ 17,9 %. Общее число молей продуктов взрыва составляет 42,12. Вычислим второй вириальный коэффициент по формуле (1):

$$b_2 = (1{,}1\cdot 37 + 24{,}1\cdot 7{,}9 + 5{,}6\cdot 21 + 12{,}1\cdot 3{,}4)/42{,}9 = 17{,}72 \text{ см}^3/\text{моль};$$

$$b_2 = 17{,}72/23{,}3 = 0{,}76 \text{ см}^3/\text{г}.$$

Теплота взрыва комбинированного ВВ $Q_{взр} = 1808$ кДж/кг или $Q_{взр} = 1808\cdot 0{,}177 =$ $= 320$ кДж/м.

При изоэнтропическом законе расширения газа из второго начала термодинамики имеем

$$PdV = -C_v dt,$$

где $C_v = C / M$; C_v – теплоемкость; C – удельная теплоемкость.

Запишем уравнение состояния в виде

$$Pf(v) = \frac{RT}{M},$$

где $f(v) = \dfrac{V}{1+\dfrac{0{,}76}{V}+\dfrac{0{,}36}{V^2}+\dfrac{0{,}130}{V^3}+\dfrac{0{,}064}{V^4}}$.

Тогда

$$\int_{V_1}^{V_2}\frac{dV}{f(v)} = \frac{C}{R}\ln\frac{T_1}{T_2}. \qquad (2)$$

---

* *Дамбаев Ж.Г.* Исследования газодинамического процесса взрыва удлиненного цилиндрического заряда // Кубатурные формулы и их приложения: Сборник тезисов. Улан-Удэ, 1997.

Для определения начальной температуры взрыва построен график зависимости энергии ε продуктов взрыва комбинированного ВВ от температуры с использованием внутренней энергии газовых продуктов H_2O, CO_2, N_2 и O_2.

Вычислим среднюю теплоемкость C_v в интервале температуры, аппроксимировав кривую зависимости внутренней энергии ε от температуры T прямой линией. Тангенс угла наклона этой прямой и будет средней теплоемкостью: $C_v = 0{,}8$ кДж/(кг·К).

Подставляя в уравнение (2) известные величины: $R = 8{,}314$ Дж/кмоль, $C_v = 0{,}8$ кДж/(кг·К), $T = 2273$ К, – получим уравнение связи объемов газа и температуры:

$$\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{f(v)} = \frac{18.4}{8{,}314} \ln \frac{2273}{T}, \qquad (3)$$

где $f(v) = \dfrac{V}{1 + \dfrac{0{,}76}{V} + \dfrac{0{,}18}{V^2} + \dfrac{0{,}43}{V^3} + \dfrac{0{,}064}{V^4}}$;

$$\left[\ln V - \left(\frac{0{,}76}{V} + \frac{0{,}09}{V^2} + \frac{0{,}143}{V^3} + \frac{0{,}016}{V^4} \right) \right]_{V_1}^{V_2} = -2{,}21 \ln T + 2{,}21 \ln 2273 + \ln V_1 \frac{0{,}76}{V_1} + \frac{0{,}18}{V_1} + \frac{0{,}043}{V_1} + \frac{0{,}016}{V_1}, \qquad (4)$$

где V_2 – величина, обратная плотности заряжания ВВ; V_1 – величина, обратная плотности ВВ.

При плотности заряжания ВВ $\rho_{ВВ} = 0{,}86$ г/см^3 удельный объем газов $V_1 = 1$ см^3/г. В этом случае формула (4) примет вид

$$\ln V - \frac{0{,}76}{V} + \frac{0{,}18}{V^2} + \frac{0{,}043}{V^3} + \frac{0{,}016}{V^4} = -2{,}21 \ln T + 2{,}21 \ln 2273 - 1{,}314 .$$

Задавая значения V в уравнении (4), получаем соответствующие значения T, подставляя их в (4), – давление газов. Расчеты дали следующие результаты:

V, см^3/г	1	2	3	4	5	6	7	8	9	20
T, К	2273	1281	993	843	750	679	657	624	584	400
P, МПа	1873	340,6	153	91	62	45	35	28	23	20

Для данного комбинированного заряда ВВ плотностью ρ = 0,86 г/см, диаметром 14 мм в шпуре диаметром 42 мм удельный объем газов $V = 7{,}9$ см^3/г, давление газов $P = 23$ МПа. Давление газов в 4 раза превышает предел прочности гранита на растяжение и примерно в 6 раз меньше, чем предел прочности на сжатие.

На основании полученной зависимости с учетом прочностных свойств гранитов карьера «Пурга» расчетным путем был установлен интервал давлений продуктов взрывного горения (от 6 до 12 МПа), обеспечивающий минимальные нарушения в околошпуровом пространстве. Этот интервал позволил разработать оптимальную конструкцию заряда. Для данного месторождения при диаметре шпура 42 мм диаметр заряда должен быть равен 14 мм с линейной массой 0,14 кг/м.

Полученные значения давления продуктов взрыва в зарядной полости были использованы для расчета расстояний между шпурами. Результаты расчетов подтвердили правильность выбранной методики определения расстояний между шпурами и позволили рекомендовать зависимость для расчета расстояния между шпурами в виде

$$L = a + b \ln R_{тр},$$

где $R_{тр}$ – радиус зоны трещинообразования, см; a и b – коэффициенты, $a = 10{,}5$, $b = 46{,}8$.

Опытно-промышленные эксперименты в натурных условиях подтвердили возможность применения комбинированного заряда ВВ (нитка ДШ и аммиачная селитра) с низкоскоростным режимом взрывчатого превращения, который позволяет снизить разрушающее воздействие взрыва на массив и обеспечить направленное разрушение горной породы. При диаметре шпу-

ров 42 мм наиболее приемлемое расстояние по технико-экономическим показателям составляет 0,5 м.

Чтобы обеспечить откол монолита от массива, необходимо создать давление в шпуре около 23 МПа. При заряде, состоящем из 93 % аммиачной селитры и 7 % тэна, это давление достигается при удельном объеме $V = 9$ г/см^3.

На основании зависимости (4) и учитывая прочностные характеристики гранитов карьера «Каменногорский», был определен интервал давлений продуктов взрыва (от 6 до 12 МПа), обеспечивающий минимальные разрушения гранитных блоков. Этот интервал позволил выбрать необходимую концентрацию заряда, т.е. оптимальный диаметр ВВ. Для данного месторождения с учетом минимальной зоны нарушенности и полного трещинообразования между шпурами диаметр заряда составляет 15 мм.

Таким образом, конструкция заряда на основе аммиачной селитры, инициируемой нитью ДШ, обеспечивает низкоскоростное взрывчатое превращение и щадящий режим нарушения горных пород и,соответственно,направленный раскол и уменьшение зоны нарушенности законтурного массива. Отличительной особенностью данной конструкции заряда является возможность регулировать процесс газогенерации и выделения потенциальной энергии ВВ, которую можно трансформировать в квазистатическую стадию давления продуктов взрыва.

Предложенный инженерный метод расчета параметров БВР для отбойки блочного камня учитывает как физико-механические свойства отбиваемых горных пород, так и конструкцию зарядов (диаметр, линейную массу ВВ). Это позволяет в полной мере реализовать технологию щадящего взрывания селективно-детонирующими зарядами не только при добыче строительных материалов из природного камня, но и при проходке горных выработок с применением контурного взрывания, добыче других полезных ископаемых.