

УДК 622.235.5

## Энергетический подход к определению параметров взрывных работ

Калякин С. А.

*Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина*

---

### Аннотация

В статье изложены результаты исследований влияния энергии взрыва ВВ на зависимости параметров взрывных работ от запредельного динамически неустойчивого состояния горных пород при разрушении, возникающем при взрывной нагрузке на них продуктов детонации. Развита энергетический подход к разрушению горных пород, учитывающий баланс между энергией взрыва заряда ВВ и критической энергоплотностью породы при ее разрушении. В результате получены зависимости, позволяющие определить необходимое количество шпуров и удельный расход ВВ в забое, в которых используются при расчете истинные показатели ВВ и горных пород.

---

Технология строительства шахт и подземных сооружений связана с разрушением горных пород энергией взрыва взрывчатых веществ (ВВ). Эффективность взрывных работ зависит от правильного расчета их параметров. К основным параметрам взрывных работ относятся: расход ВВ, масса шпурового заряда, число шпуров в забое и др., определение которых, как правило, базируется на использовании эмпирических данных, полученных в результате опытных взрываний различных типов и классов ВВ в отличных друг от друга горно-геологических условиях. Опыт применения эмпирических зависимостей при расчете этих параметров показал, что они не всегда совпадают с реальными значениями, полученными в различных условиях при строительстве шахт и подземных сооружений.

Анализ последних исследований в этой области, сделанный Г. Г. Литвинским [1] показал, что расчет параметров взрывных работ, основанный на эмпиризме себя исчерпал, и настало время фундаментальных исследований, основанных на положениях теории физики взрыва и физики твердого тела.

В работах [2, 3, 4] автором даны решения задач по определению к.п.д. взрыва в горной породе, его эффективности и параметров буровзрывных работ (БВР) при проведении горных выработок. Однако необходимы решения инженерных и научных задач разрушения горных пород, в которых используется связь их динамического сопротивления разрушению с энергией разрушения, транслируемой породам импульсным действием продуктов детонации заряда ВВ. При этом необходимо использовать физически правильный энергетический подход к обоснованию и определению параметров взрывных работ, исходя из критической энергоплотности вещества в породе, создаваемой энергией взрыва заряда ВВ, зависящей как от его детонационных свойств, так и от акустической жесткости горных пород. До настоящего времени в области взрывного дела такой подход детально не рассматривался.

Целью данной статьи является исследование влияния энергии взрыва ВВ на зависимость параметров взрывных работ от запредельного динамически неустойчивого состояния горных пород при разрушении, возникающего при взрывной нагрузке на них продуктов детонации. В основе этих исследований лежит энергетический подход к разрушению горных пород, учитывающий баланс между энергией взрыва заряда ВВ и критической энергоплотностью вещества породы при ее динамической деформации в зоне действия ударных волн, образованных при взрыве.

Совершенствование БВР и определение эффективных параметров взрывных работ базируется на использовании в расчетах удельного расхода ВВ в кг на  $1 \text{ м}^3$  обуренной породы в массиве –  $q_{ВВ}$ , объема взрывающей породы –  $V_{п}$ , массы ВВ в шпуровом заряде –  $m_{ВВ}$ , числе шпуров –  $N_{ш}$ . Согласно работе [5], все перечисленные параметры можно привести к равенству:

$$q_{BB} \cdot V_{\Pi} = N_{ш} \cdot m_{BB},$$

из которого после несложных преобразований получается уравнение для определения числа одновременно взрывааемых шпуров:

$$N_{ш} = \frac{1,274 \cdot q_{BB} \cdot S_{\epsilon}}{\gamma_{ш} \cdot d_n^2 \cdot \rho_{BB}}, \quad (1)$$

где  $S_{\epsilon}$  – сечение горной выработки, м<sup>2</sup>;

$\gamma_{ш}$  – коэффициент заполнения шпура ВВ:  $\gamma_{ш} = (1 - \frac{\ell_0}{\ell_{ш}})$ ;

$\ell_0$  – длина забоечной или свободной от заряда ВВ части шпура, м;

$\ell_{ш}$  – длина шпура, м;

$d_n$  – диаметр патронов ВВ в заряде, м;

$\rho_{BB}$  – плотность патронирования ВВ, кг/м<sup>3</sup>.

Произведение удельного расхода ВВ на сечение выработки дает величину расхода ВВ на 1 м разрушаемого взрывом шпура –  $\bar{q}_{ш}$ :

$$\bar{q}_{ш} = q_{BB} S_{\epsilon} = \frac{m_{BB}}{\ell_{ш}}. \quad (2)$$

В соответствии с законом энергетического подобия при взрыве массу заряда можно представить как отношение энергии взрыва, передаваемой горным породам при их разрушении –  $E_n$  к удельной теплоте взрыва 1 кг ВВ –  $Q_V$ :

$$m_{BB} = \frac{E_n}{Q_V}. \quad (3)$$

При этом разрушение горных пород будет происходить только в том случае, если будет выполняться следующее условие:

$$E_n \geq \frac{[\sigma]_{ш} \cdot \ell_{ш} \cdot S_{\epsilon}}{\eta}, \quad (4)$$

где  $[\sigma]_{ш}$  – критическая энергоплотность породы, при которой наступают необратимые деформации, приводящие к ее разрушению;

$\eta$  – коэффициент трансляции энергии взрыва заряда ВВ в горную породу, учитывающий диссипативные потери энергии при ее передаче и в процессе разрушения.

После подстановки уравнений (2), (3), (4) в уравнение (1) можно получить уравнение для расчета необходимого количества шпуров на 1 м<sup>2</sup> выработки при разрушении горных пород взрывным способом:

$$N_{ш} = \frac{N_{ш}}{S_{\epsilon}} = \frac{1,274[\sigma]_{ш}}{Q_V \cdot \eta \cdot \rho_{BB} \cdot d_n^2 \cdot \gamma_{ш}}, \text{ шп/м}^2. \quad (5)$$

Проанализируем уравнение (5). Прежде всего, необходимо определить порядок величины критической энергоплотности горной породы, при которой в ней происходят необратимые деформации и разрушение. В соответствии с наиболее широко распространенным представлением о механизме разрушения горных пород взрывом, сформулированным Г. И. Покровским, В. Н. Родионовым и А. Н. Ханукаевым [6], его можно описать следующим образом. Под действием импульса давления продуктов детонации ВВ вблизи зарядной камеры в горных породах образуется зона их пластических деформаций, которая переходит в зону радиальных трещин, образованную поперечно-растягивающими напряжениями, аналогией возникновения которых может служить случай деформирования пород под действием в них

внутреннего давления. Дальнейшее разрушение горного массива возможно только при наличии свободной поверхности, отражаясь от которой волна сжатия (ударная волна) переходит в волну растяжения (волну разряжения), которая дополнительно разрушает породы с помощью растягивающих напряжений. Таким образом, разрушение горных пород и их отрыв от массива произойдет тогда, когда растягивающие напряжения в ней достигнут значения прочности породы отрыву. Поэтому максимальное растягивающее напряжение, испытываемое горной породой в момент разрушения при взрыве равно его пределу прочности на отрыв. В работах [7, 8] временное сопротивление горной породы отрыву –  $\sigma_{отр}$  и его предел прочности на растяжение –  $\sigma_{раст}$  практически равны. Этот факт дает основание считать, что в качестве величины критической энергоплотности породы при разрушении можно принять ее предел прочности на растяжение или отрыв:  $[\sigma]_и = \sigma_{отр} = \sigma_{раст}$ . Энергетический подход к оценке свойств горных пород с позиции энергоплотности вещества является корректным. Справедливость данного утверждения доказана в работе [9], в которой указано, что прочностные свойства породы есть адекватная форма выражения энергии ее кристаллической решетки. Это связано с физической природой прочности твердых тел. Их прочность обусловлена, в конечном счете, силами взаимодействия между атомами и ионами в кристаллической решетке твердого тела. При растяжении горной породы на ее кристаллическую решетку действует такая сила, что приходящаяся на данную пару атомов внешняя сила превосходит максимальную силу их притяжения. Для горных пород из-за сложности их состава, неоднородности структуры, наличия дефектов и других факторов подход к оценке свойств на базе расчета энергии кристаллической решетки затруднен. Однако фундаментальность подхода к оценке свойств горных пород с позиции энергоплотности вещества не вызывает сомнений. Приходится заострять внимание на этом вопросе, т. к. в уравнении (5) в знаменателе присутствует произведение удельной теплоты взрыва  $ВВ$  на его плотность, которое характеризует энергетическую плотность взрывчатого вещества при детонации заряда. Поэтому очевидно, что масштаб разрушения горной породы при взрыве заряда  $ВВ$  определяется соотношением между величиной энергетической плотности породы, необходимой для ее разрушения, и плотности энергии взрыва, выделяющейся при детонации. Для аналитического решения уравнения (5) необходимо установить, как происходит передача энергии взрыва  $ВВ$  горным породам и влияние на этот процесс коэффициента  $\eta$ , ответственного за перераспределение энергии взрыва между горной породой и продуктами детонации  $ВВ$ . Остановимся на этом моменте подробнее, используя основные положения теории физики взрыва  $ВВ$  в горной породе. При этом считается, что весь рассматриваемый процесс разрушения горной породы взрывом разбит на четыре отдельных этапа.

Первый этап. В зоне, близкой к взрывной камере с продуктами детонации  $ВВ$ , движение горной породы рассматривается как движение уплотняющейся во фронте ударной волны жидкости, которая вытесняется из этой зоны. На первом этапе движения происходит переход части потенциальной энергии продуктов детонации  $ВВ$  в кинетическую энергию горной породы.

Второй этап. В отличие от первого этапа горная порода считается твердой хрупкой средой, в которой под действием ударной волны возникают касательные и нормальные напряжения, приводящие к ее разрушению. Принимается, что фронт разрушения совпадает с ударным фронтом. Поэтому сначала раздробленная масса породы упакована очень плотно, а при последующем ее растяжении вдоль оси действия ударной волны она подвергается дилатансии – увеличению объема дробленной горной массы.

Третий этап. Этот этап начинается с момента, когда скорость фронта разрушения становится меньше скорости ударного фронта, в результате чего устанавливается скорость движения гранулированной раздробленной среды между фронтом разрушения и взрывной полостью с внутренним сухим трением между частицами. На третьем этапе расширение полости взрыва происходит не только за счет дилатансии, но и движения разрушенных пород.

Четвертый этап. Этот этап характеризуется распространением по горной породе упругих волн, а при наличии свободной поверхности – волн разгрузки, которые вызывают

дополнительные разрушения горных пород и способствуют их движению под действием расширяющихся газообразных продуктов детонации ВВ.

Таким образом, энергия взрыва заряда ВВ при разрушении горной породы расходуется на образование в ней ударных волн, движение разрушенной породы, расширение газообразных продуктов детонации и диссипации энергии при образовании упругих волн, нагреве пород и создании остаточных упругих напряжений. В целом механизм диссипации энергии в горных породах и воде и воздухе при взрыве ВВ различен. В воде и воздухе после ударного нагружения и последующего изоэнтропийного расширения плотность среды оказывается меньше начальной за счет необратимого ударного нагрева среды. В горных породах кривая их ударного нагружения и кривая разгрузки не совпадают между собой, причем после разгрузки до первоначального напряжения плотность среды оказывается больше начальной, что определяет величину необратимых потерь энергии взрыва. Поэтому коэффициент трансляции энергии взрыва заряда ВВ –  $\eta$  представляет собой многофакторную функцию, зависящую как от свойств разрушенных взрывом горных пород, так и от процесса расширения газообразных продуктов детонации ВВ при совершении ими работы над дробленой ударной волной породой.

Для решения задачи определения давления во фронте ударной волны в горной породе при взрыве ВВ используют акустическую жесткость породы –  $C_n$ , которая характеризует ее сопротивляемость распространению ударной волны и численно равна произведению скорости волны возмущения в породе –  $D_n$  на ее плотность  $\rho_n$ :

$$C_n = \rho_n \cdot D_n.$$

Эффективность работы продуктов взрыва ВВ при разрушении пород можно оценить величиной коэффициента полезного действия –  $\eta_{BB}$ . В этом случае, коэффициент трансляции энергии взрыва заряда ВВ в горную породу представляет собой многофакторную зависимость от переменных, определяемых через акустическую жесткость породы, продуктов детонации ВВ –  $C_{BB}$ , а также к. п. д. взрыва:

$$\eta = \varphi(C_{BB}, C_n, \eta_{BB}). \quad (6)$$

В соответствии с уравнением (6) плотность энергии в горных породах, создаваемая взрывом при детонации ВВ составит величину не менее:

$$Q_V \cdot \rho_{BB} \cdot \eta \approx \frac{2\rho_{BB}D^2 \cdot \eta_{BB}}{(n+1)\left(1 + \frac{\rho_{BB} \cdot D}{\rho_n \cdot D_n}\right)}, \quad (7)$$

где  $D$  – скорость детонации ВВ;

$n$  – показатель политропы процесса детонации ВВ.

Окончательно уравнение (5) с учетом уравнения (7) будет иметь следующий вид:

$$N_y \geq \frac{1,274[\sigma]_u (n+1)\left(1 + \frac{\rho_{BB} \cdot D}{\rho_n \cdot D_n}\right)}{2\rho_{BB}D^2 \cdot d_n^2 \cdot \gamma_u \cdot \eta_{BB}}, \text{ шп/м}^2. \quad (8)$$

При определении эффективных параметров взрывных работ необходимо учитывать связь между к. п. д. взрыва ВВ и коэффициентом использования шпура –  $\eta_{к.и.ш.}$ , которая ранее установлена и имеет следующий вид:

$$\eta_{BB} = \eta_{к.и.ш.}^2.$$

Учитывая то, что фактическое количество шпуров на 1 м<sup>2</sup> выработки –  $N_{вр}$  должно быть больше расчетного по уравнению (8) и значение для к. и. ш. при БВР не менее  $\eta_{к.и.ш.} = 0,9$ , было получено уравнение для расчета необходимого числа шпуров на 1 м<sup>2</sup> проводимой буровзрывным способом выработки:

$$N_{B.P} = \frac{0,786[\sigma]_u \cdot (n+1) \cdot \left(1 + \frac{\rho_{BB} \cdot D}{\rho_n \cdot D_n}\right)}{\rho_{BB} D^2 \cdot d_n^2 \cdot \gamma_u}, \text{ шп/м}^2 \quad (9)$$

Удельный расход ВВ при взрывных работах определяется по следующей формуле:

$$q_{BB} = N_{B.P} \cdot \gamma_u \cdot d_n^2 \cdot \rho_{BB}, \text{ кг/м}^3. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) позволяют установить все параметры взрывных работ: сетку шпуров в забое, расстояние между смежными шпурами, величину заряда ВВ на шпур и общее количество ВВ на цикл.

Важным достоинством полученных зависимостей (9) и (10) является то, что с их помощью можно установить параметры взрывных работ, используя объективные параметры ВВ (скорость детонации заряда, плотность патронирования, диаметр заряда) и динамические свойства горных пород (акустическая жесткость, плотность породы, скорость ударной волны, ударная адиабата, предел прочности на отрыв). Эти параметры гораздо более информативные в части отражения истинных свойств ВВ, чем его работоспособность в свинцовой бомбе ( $\Delta V$ , см<sup>3</sup>) или крепость  $f$  по шкале проф. М. М. Протодяконова для горной породы. Величины этих параметров могут быть получены с помощью надежных методов расчета на базе экспериментальных данных свойств горных пород и испытаний ВВ. Так Л. В. Альшутером установлено, что в широком диапазоне амплитуд ударных волн в горных породах их ударная адиабата описывается зависимостью:

$$D_n = A + Bu, \text{ м/с}, \quad (11)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные, определенные экспериментально;

$u$  – массовая скорость частиц породы за фронтом ударной волны, м/с.

Решение уравнения (11) совместно с уравнением, учитывающим неодинаковую акустическую жесткость горной породы и ВВ, позволяет определить массовую скорость частиц породы за фронтом ударной волны на границе ее контакта с зарядом ВВ:

$$u = \frac{2P_{BB}}{\rho_n D_n + \rho_{BB} D_{BB}}$$

или

$$u = \frac{-(\rho_n A + \rho_{BB} D_{BB}) + \sqrt{(\rho_n A + \rho_{BB} D_{BB})^2 + 8B\rho_n \cdot P_{BB}}}{2\rho_n B}, \text{ м/с}. \quad (12)$$

Решение уравнений (11), (12) совместно с (9) и (10) позволяет установить надежные и эффективные параметры взрывных работ в забое при проведении горной выработки. В качестве примера приведем расчет параметров взрывных работ при разрушении известняка аммонитом № 6ЖВ в патронах диаметром 0,032 м и плотностью заряжения 1050 кг/м<sup>3</sup>. Предел прочности известняка на отрыв  $[\sigma]_u = 6,867 \cdot 10^6$  Па, плотность  $\rho_n = 2600$  кг/м<sup>3</sup>, уравнение ударной адиабаты  $D_n = 3500 + 1,43 u$ .

Табл. 1. Результаты расчета параметров взрывных работ для аммонита № 6ЖВ при разрушении известняка шпуровым методом ( $d_u = 0,042$  м)

Параметры заряда ВВ					Параметры породы				Параметры взрывных работ	
$D$ , м/с	$n$	$\rho_{BB}$ , кг/м <sup>3</sup>	$d_n$ , м	$\gamma_u$	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$D_n$ , м/с	$u$ , м/с	$[\sigma]_u$ , Па	$N_{BP}$ , шп./м <sup>2</sup>	$q$ , кг/м <sup>3</sup>
4400	2,3	1050	0,032	0,5	2600	4567,95	746,82	$6,867 \cdot 10^6$	2,38	1,278

Результаты расчета параметров взрывных работ достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет сделать следующие выводы:

1. Энергетический подход к определению параметров взрывных работ позволил получить уравнения для расчета количества шпуров на  $1 \text{ м}^2$  забоя и удельного расхода ВВ на  $1 \text{ м}^3$  взрывающей породы, которые необходимы при составлении паспорта БВР.

2. Полученные зависимости для определения необходимого количества шпуров и удельного расхода ВВ позволяют использовать в расчете истинные показатели ВВ: его скорость детонации, диаметр заряда, плотность патронирования и объективные показатели, характеризующие динамическую прочность горных пород: акустическую жесткость, плотность породы, скорость в породе ударной волны, уравнение ударной адиабаты, предел прочности на отрыв (растяжение). Это позволяет значительно повысить надежность расчетов.

Дальнейшие работы необходимо проводить в направлении всесторонних исследований процесса детонации ВВ в шпурах и определения уравнений ударных адиабат для горных пород в разрушаемом массиве.

### Библиографический список

1. Литвинский Г. Г. К теории взрыва подземного заряда на выброс-диаграмма-квадрат взрыва // *Материалы международной конференции «Форум горняков – 2007»*. – Д.: Национальный горный университет, 2007. – С. 90–101.
2. Калякин С. А., Конько С. В. Вычисление к. п. д. взрыва ВВ при взрывных работах // *Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений*. Вып. № 13 / *Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – С. 44–47.
3. Калякин С. А., Трошнев А. И., Селешев Д. А. Определение оптимальных параметров БВР при проходке горизонтальных выработок // *Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений*. Вып. № 13 / *Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – С. 167–169.
4. Калякин С. А., Гришняков В. И. Повышение эффективности взрыва ВВ в горной породе // *Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений*. Вып. № 13 / *Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – С. 175–177.
5. Покровский Н. М. *Технология строительства подземных сооружений и шахт*. – М.: Недра, 1977. – 399 с.
6. Кутузов Б. Н., Тарасенко В. П. *Физика взрывного разрушения горных пород* // *Учебное пособие*. – М.: МГИ, 1975. – 152 с.
7. *Свойства горных пород и методы их определения* / Ильницкая Е. И., Тедер Г. И., Ватолин Е. С., Кунтыш М. Ф. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
8. Ханукаев А. Н. *Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом*. – М.: Недра, 1962. – 199 с.
9. Горобец Л. Ж., Дуброва С. Б. *Оценка энергетических параметров горных пород на стадии саморазрушения* // *Деформирование и разрушение горных пород*. Бишкек: Илим, 1990. – С. 350–358.

© Калякин С. А., 2008.