© В.П. Тарасенко, 2008

УДК 622.026.5

В.П. Тарасенко

ВЗРЫВАЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД И ЕЕ РОЛЬ В ОПРЕДЕЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Анализ показывает, что уникальные и многогранные возможности, связанные с использованием результатов взрывов сосредоточенных зарядов для прогнозирования эффективности различных методов взрывных работ, раскрыты далеко не полностью. Одним из центральных направлений реализации таких возможностей является в частности оценка работоспособности взрывчатых веществ.

Под полной работоспособностью принято подразумевать сумму всех форм механической работы взрыва. Интегральной характеристикой этих форм работы взрыва является удельный расход ВВ. Величина удельного расхода может быть установлена экспериментально или аналитически. Среди экспериментальных методов определения удельного расхода доминирует метод воронкообразования, основанный на применении сосредоточенных зарядов выброса. Особое место в ряду взрывов этого класса занимают взрывы нормального выброса при показателе действия взрыва n=1. С одной стороны, значения удельного расхода ВВ для взрывов нормального выброса приведены в нормативных справочниках, а с другой, являются основной расчетов удельных расходов ВВ при взрывах с отличным от нормального выброса характером действия.

Приведенные в справочниках значения удельных расходов для взрывов нормального выброса и взрывов на рыхление получены применительно к обширному массиву различных горных пород и охватывают практически весь диапазон их изменения по величине коэффициента крепости. Ценность табличных данных бесспорна и очевидна. Важно отметить однако, что в последнее время изменились требования к качеству взрывной подготовки горных пород к выемке, а вместе с ними нормативы удельных расходов ВВ. Новые нормативы значительно отличаются от систематизированных ранее на основе более чем полувекового опыта взрывных работ для ныне устаревших технологий. Появились новые данные об особенностях действия сосредоточенных и удлиненных зарядов, критериях их разделения. Получены новые оценки величин существенно различных, по сравнению с табличными, удельных расходов на рыхление для сосредоточенных и удлиненных зарядов в идентичных условиях. Всё перечисленное очень важно не только для определения взрываемости массивов горных пород, но и устанавливаемой на её основе работоспособности различных ВВ. Становится очевидной необходимость значительной корректировки представленных в справочниках табличных значений удельных расходов ВВ как для зарядов нормального выброса, так и для зарядов рыхления.

Ранее автором было установлено, что табличные значения $К_Э$ удельного рас-

хода аммонита 6ЖВ хорошо аппроксимируются выражением

$$К_Э = К_0 (Af), \quad (1)$$

где $К_0$= 1 $^{кг}/_{м^3}$ коэффициент пропорциональности применительно к аммониту №6ЖВ; принятому в качестве эталонного ВВ при формировании массива табличных значений $К_Э$; А – акустический показатель трещиноватости конкретной породы; f - коэффициент крепости пород по М.М. Протодьяконову.

Удельный расход $К_Э$ характеризует взрываемость горных пород в стандартных условиях (аммонит 6ЖВ, взрыв нормального выброса). Введение в формулу (1) параметра А является первым шагом в осуществлении коррекции табличных значений $К_В$. Второй шаг в этом направлении связан с необходимости учета влияния на взрываемость породы показателя её относительной вязкости $\lambda_Э$:

$$\lambda_Э = (8 – G_{сж} / 2G_{сдв}), \quad (2)$$

где $\lambda_Э$ – показатель относительной вязкости породы при взрыве в ней этелонного ВВ (аммонит №:ЖВ); $G_{сж}$ и $G_{сдв}$ - пределы прочности породы на сжатие и сдвиг соответственно.

Скорректированная с учетом поправки на относительную вязкость конкретной породы величина удельного расхода этелонного ВВ $К_В$ составит:

$$К_В = К_Э (5,5/\lambda_Э)^{1,5} = К_0 (Af)^{1/4} (5,5/\lambda_Э)^{1,5} \quad (3)$$

В случае применения других ВВ, отличных от эталонного, получим:

$$К_п = К_о (Af)^{1/4} (5,5/\lambda_р)^{3/2} \quad (4)$$

Параметр $\lambda_р$ в выражении (4) – расчетная величина показателя относительной вязкости для конкретного ВВ (и это третий шаг корректировки значения $К_э$) определяется как:

$$\lambda_р = \lambda_э \sqrt[3]{\Delta U/\Delta_э U_э} \quad (5)$$

где $U_u U_э$ - удельная энергия испытуемого и эталонного ВВ соответственно, реализуемая в процессе формирования воронок нормального выброса; Δ и $\Delta_Э$ - плотность заряжания для испытуемого и эталонного ВВ. Абсолютные значения U и $U_Э$ неизвестны, а $U/U_Э$ по существу определяет относительную (к эталонному) работоспособность испытуемого ВВ. В отличие от удельной теплоты взрывчатых веществ параметры U и $U_Э$ в значительной мере зависят от взрываемости разрушаемых горных пород. Величина отношения $U/U_Э$ может быть рассчитана на основе уравнений (4) и (5).

Для эталонного ВВ (аммонит №6ЖВ) величина удельного расхода $К_В$, определяемая выражением (3), является одновременно как оценкой взрываемости конкретной породы так и работоспособности в ней аммонита №6ЖВ. При использовании других ВВ значения удельных расходов ВВ при определении взрываемости пород и оценке работоспособности ВВ в них не совпадают. Решив совместно уравнения (4) и (5) получим:

$$К_п = К_0(Af)^{1/4}(5,5/\lambda_Э)^{3/2}(\Delta_Э U_Э/\Delta U)^{1/2} \quad (6)$$

В этом соотношении $К_п$ – полный расчетный реальный удельный расход ВВ на формирование воронки нормального выброса. Выражение для расчета $К_п$ включает базовую часть удельного расхода и, определяющую её поправку на относительную работоспособность применяемого ВВ. Из соотношения (5) следует, что показатель относительной вязкости породы служит некоей сшивкой между взрываемостью породы и работоспособностью ВВ в ней. Действительно параметр $\lambda_р$ определяет степень склонности породы к проявлению свойств пластичности при её разруше-

нии взрывом. Чем меньше реальная относительная работоспособность ВВ, тем меньше величина $\lambda_р$ и больше сопротивляемость породы действию взрыва. Взрываемость породы при этом ухудшается что приводит к росту величины полного удельного расхода.

В целях упорядочения терминологии целесообразно ввести в рассмотрение понятие: потенциальная относительная работоспособность ВВ и реальная относительная работоспособность ВВ.

Наибольшую известность для определения потенциальной относительной работоспособности $e_п$ получили формулы, предложенные Лангефорсом:

$$e_п = 5/6\ Q/Q_Э + 1/6\ Vг/Vгэ \qquad (7)$$

Кубибом Б.Н. и др. [1]

$$t_g = (\ Q|Q_»)^{0?75}\ (V_U|V_{U»})^{0?25} \qquad (8)$$

где Q и $Q_Э$ – удельная теплота взрыва исследуемого и эталонного ВВ;

Формулы (7) и (8) просты, так как содержат лишь два основных динамических параметра, позволяющих адекватно оценить потенциальные возможности собственно ВВ без учета свойств разрушаемой взрывом породы. В связи с этим возникает необходимость обеспечения сопряженности формулы (7) или (8) с оценками относительной реальной работоспособности ВВ на основе величин $К_п$ полного удельного расхода ВВ, или отношения $V/U_э$.. Решить поставленную задачу можно, использовав метод воронкообразования и его наиболее информативную форму – взрыв нормального выброса. Именно для этой формы взрыва удельный расход ВВ $К_п$ наиболее просто и надежно (на основе контроля свойств породы, определяющих её взрываемость) можно установить как экспериментальным, так и расчетным (формула 6) путем. Однако удельный расход $К_п$ характеризует абсолютную реальную, а не относительную работоспособность ВВ. По этой причине для поиска соотношения, связывающею относительную потенциальную и относительную реальную работоспособность ВВ, целесообразно использовать параметр, $U/U_э$. Исходным для расчета величины $U/U_э$ является ранее установленное автором соотношение

$$Pl_c/r^3 = K_0(Af)^{1/4}\ (5{,}5/\lambda_р)^{3/2} \qquad (9)$$

где P – вместимость ВВ в единице длины скважины, кг/м; l_c – длина (высота) сосредоточенного заряда цилиндрической формы; r – радиус воронки нормального выброса на уровне открытой поверхности r = Wc, где Wc – глубина заложения сосредоточенного заряда нормального выброса.

После подставки в (9) значения $\lambda_р$, определяемого уравнением (5) и необходимых преобразований получим:

$$Pl_c\ /\ r^3 = K_0(Af)^{1/4}(5{,}5\ /\ \lambda_р)^{3/2}, \qquad (10)$$

Анализ уравнения (10) показывает, что в нём произведение $K_0^2\ (Af)^{1/2}\cdot(5{,}5/\lambda_Э)^3$ есть K_B^2, как это следует из уравнения (3). В свою очередь сомножитель $r^6/(Pl_c\ )^2$ равен определяемому экспериментально или устанавливаемому расчетом по формуле (6) квадрату полного удельного расхода ВВ, необходимого для образования воронки взрыва нормального выброса. На основе проведенного анализа получим:

$$U/U_Э = (K_B/K_п\ )^2 \cdot \Delta_Э/\Delta \qquad (11)$$

Для установления вида соотношения, связывающего $e_п$ и $U/U_Э$ используем две различные формы записи уравнения, определяющего величину $К_п$. Первая из них:

$$К_{п1} = K_0\ (Af)^{1/4} \cdot (5{,}5/\lambda_Э)^{3/2}\cdot 1/e_п \qquad (12)$$

Вторая форма записи:

$$К_{п2} = K_0\ (Af)^{1/4} \cdot (5{,}5/\lambda_Э)^{3/2}\times$$
$$\times\ (\Delta_Э U_Э/\Delta U)^{1/2} \qquad (13)$$

Таблица 1

№	ВВ	Q, кдж/кг	$V_г$, $м^3$/кг	Δ, кг/$м^3$	$e_п$	$U/U_Э$	$U/U_Э$ / $e_п$	$\lambda_р$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Аммонит №6ЖВ	4305	0,895	900	1	1	1	$\lambda_р=\lambda$
2.	Сибирит 1000	3050	0,913	1250	0,76	0,42	0,55	4,06
3.	Гранэмит И-30	3350	0,938	1400	0,82	0,43	0,52	4,27
4.	Iremax 500 (USA)	3347	0,964	1150	0,83	0,54	0,65	4,31
5.	Гранемит И-70	3630	0,962	1250	0,88	0,56	0,64	4,48
6.	Акватол Т-10 МС	3680	0,960	1480	0,89	0,48	0,54	4,51
7.	Гранулотол	3642	1,045	950	0,90	0,77	0,86	4,55
8.	ANFO	3910	0,973	900	0,94	0,88	0,94	4,68
9.	Игданит	3973	0,980	1100	0,95	0,92	0,78	4,72
10.	Emulite 150	4100	0,840	1200	0,95	0,68	0,72	4,72
11.	Алюмотол	5266	0,815	1000	1,17	1,23	1,05	5,42

В уравнении (12) сомножитель $1/ e_п$ - переводной коэффициент, характеризующий термодинамический потенциал исследуемого ВВ. Приравняв $К_{п1}$ и $К_{п2}$, после сокращений получим

$$U/U_Э = e_п Δ_Э / Δ \qquad (14)$$

формулу, устанавливающую взаимосвязь между реальной относительной и потенциальной относительной работоспособностью ВВ. Величина $e_п$, в приводимых ниже расчетах, будет определяться по формуле (7).

Совместное решение уравнений (5) и (14) приводит к соотношению:

$$\lambda_р = \lambda_э\, e_п^{3/2} \qquad (15)$$

Важно отметить, что формула (14) одинаково приемлема как для сосредоточенных, так и удлиненных зарядов. Замечание справедливо и в отношении формулы (15).

В табл. 1 для ряда отечественных и зарубежных промышленных взрывчатых веществ приведены расчетные величины, характеризующие их сравнительную относительную работоспособность в конкретной породе. Порода – руда кальцит – магнетитовая с апатитом и фостеритом (Ковдорский ГОК), имеет следующие параметры физико – технических свойств:

Прочность, МПА:

$G_{сж} = 100,0$; $G_{сдв} = 16,0$; $G_р = 9,0$.

$\lambda_э = 4,88$; $A_{ср.} = 0,68$; $C = 3910$ м/с

Несколько неожиданной является приведенная в табл. 1 низкая оценка величины реальной относительной работоспособности «Сибирита-1000», для которого $U/U_Э = 0,42$. В связи с этим, целесообразно обратиться к анализу результатов реальных взрывов. В приложении №4 к типовому проекту взрывных работ на карьерах ОАО « Карельский окатыш» приведены величины средних удельных расходов 329 г/т штатного ВВ (гранулотол) и 510 г/т эмульсионных ВВ близких к «Сибириту-1000». Приведенные к эталонному ВВ аммониту №6ЖВ, величины средних удельных расходов составят: 0,76·510 = 387,6 г/т для Сибирита и 0,9·321 = 288,9 для гранулотоя. В анализируемом примере 0,76 и 0,9 значения $e_п$ для Сибирита и гранулотола, приведенные в табл. 1. Для определения величины относительной работоспособности эмульсионного ВВ типа Сибирита-1000, воспользуемся отношением (11) в соответствии с которым получим:

$$U/U_Э = (288,9/387,6)^2 0,9/1,25 = =0,56·0,72 = 0,4$$

Таблица 2

Аммониты №6ЖВ	Гранэмит И-70
$K_в=(Af)^{1/4}(5,5/\lambda_э)^{1/5}=6,8^{1/4}(5,5/4,88)^{1/5}=1,93$ кг/м³ $\beta = \beta_{ср} = 0,25$ $l_{заб} = 28d/(1+0,5\beta)^{1/5}\ \sqrt{\Delta_э\beta/K_в} = 28\cdot0,25/$ $/(1+0,5\ 0,25)^{1,5}\cdot\sqrt{0,9\cdot0,25/1,93} = 1,29 = 2$ м. $l_c = \beta l_{заб} = 0,25\cdot2 = 0,5$ м $r = Wc = (1+0,5\beta)\ l_{заб} = 1,125\cdot2 = 2,25$ м $V = r^3 = 2,25^3 = 11,39$ м³ $Q_c = P\ l_c = \pi d^2/4\cdot1\cdot900\cdot0,5 = 22,1$ кг $\nu_э = V/Q_c = 11,39/22,1 = 0,52$	$A\ e_п = 5/6\cdot3,63/4,3 +$ $+1/6\cdot0,962/0,895 = 0,88$ $\lambda_р = \lambda_э\ e_п^{2/3} = 4,88\cdot0,88^{2/3} = 4,48$ $\beta = \beta_{ср} = 0,18$ $l_{заб} = 28\cdot0,25/(1+0,5\cdot0,18)^{1,5}\times$ $\times\sqrt{1,15\cdot0,18/2,19} = 1,96$ м $K_п = 6,8^{1/4}\ (5,5/4,48)^{1,5} = 2,19$ кг/м³ $l_c = \beta l_{заб} = 0,18\cdot1,96 = 0,35$ м $Q_c = Pl_c = \pi d^2/4\cdot1\cdot1250\cdot0,35 =$ $=61,3\cdot0,35 = 21,45$ $r = (1+0,5\beta)l_{заб} = (1+0,5\cdot0,18)1,96 = 2,14$м $V = r^3 = 2,14^3 = 9,8$ м³ $\nu = 9,8/21,45 = 0,46$

полученный результат находится в хорошем соответствии с оценкой, содержащейся в табл. 1. Низкая реальная относительная работоспособность некоторых разновидностей эмульсионных ВВ является их серьезным недостатком наряду с известными достоинствами. Указанные обстоятельства должны приниматься во внимание при выборе ВВ этого класса в конкретных условиях взрывания.

Объяснить низкие значения $U/U_Э$ для ряда взрывчатых веществ, представленных в табл. 1, можно опираясь на развернутую форму представления уравнения (14). Предлагаемая форма записи уравнения имеет следующий вид:

$$U/U_Э = e_п\ V/V_э\ \Delta_э/\Delta \qquad (16)$$

где $V = 1/K_п$ и $V_э = 1/K_в$ - удельные объемы разрушения породы при формировании воронок нормального выброса взрывами испытуемого и эталонного ВВ. Из (16) следует, чем ниже $e_п$, потенциал исследуемого ВВ по отношению к аммониту №6ЖВ, тем меньше величина $U/U_Э$. С другой стороны если $V<V_э$ и $\Delta_э>\Delta$, т.е. меньший удельный объем получен при большей, по сравнению с эталонным ВВ, плотностью заряжения, то совокупное уменьшение $U/U_Э$ составит $V/V_e\ \Delta_э/\Delta$ раз. Покажем это, сопоставив в качестве примера возможности гранэмита И-70 и аммонита №6ЖВ. Приведенные ниже расчеты выполнены на основе предшествующих публикаций автора [2, 3] применительно к упомянутой ранее руде кальцит-магнититовой с апатитом и фостеритом (см. комментарий к табл. 1).

Среди основных рассчитываемых параметров сосредоточенных зарядов нормального выброса: l_c – длина заряда, Q_c – масса заряда, W_c – глубина заложения заряда, $l_{заб}$ – длина забойки. Все они определяются с помощью показателя β, устанавливаемого расчетом и характеризующим условия перехода от центральной к осевой симметрии в развитии взрыва. При этом сосредоточенным следует считать заряд, длина которого $l_{зар}\leq l_c = =\beta l_{заб}$. Основные расчетные параметры (они могут быть установлены и экспериментально), характеризующие воронку нормального выброса – её объём V, глубина воронки $W=W_c$ и радиус воронки $r = W_c$ на уровне открытой поверхности. Необходимые расчеты параметров воронок сосредоточенных зарядов $d_{зар}$ = 0,25 м и параметров воронок нормального выброса для аммонита №6ЖВ и гранэмита И-70 приведены в табл. 2.

Подставив, полученные в результате расчетов, значения $U_э$ и U в формулу (16) получим:

$N/N_э = 0,88 \cdot 0,46/0,52 \cdot 0,9/1,25 = =0,56.$

Тот же результат для оценки реальной относительной работоспособности гранэмита И-70 следует и из расчета по формуле (14), что нашло отражение в табл. 1. Однако в отличие от формулы (14) формула (16) позволяет дать полный комментарий к оценкам реальной относительной работоспособности различных ВВ, взрываемых в одной и той же породе.

Расчет параметров взрывной отбойки удлиненными скваженными зарядами основывается на знании параметров $e_п$, $U/U_Э$, $\lambda_р$, β, установленных для сосредоточенных зарядов, формирующих воронки нормального выброса в конкретных условиях взры-вания. Относительная эффективность пары удлиненных зарядов сравниваемых ВВ зависит от сочетания нескольких основных факторов. При этом известен прием, позволяющий весомость влияния каждого из факторов представить в виде некоторого множителя. Произведение таких множителей позволяет учесть совокупное влияние на результатах взрыва наиболее значимых факторов.

Пусть $П_1/П_2$ – развернутый показатель сравнительной относительной эффективности действия удлиненных зарядов сопоставляемых ВВ. Тогда:

$П_1/П_2 = P_q \cdot P_{др} \cdot P_п \cdot P_в$ (17)

где P_q, $P_{др}$, $P_п$, $P_в$ - безразмерные коэффициенты являющиеся отношением основных параметров, определяющих результаты взрывов удлиненных зарядов, сравниваемых ВВ. Рассматриваемые коэффициенты характеризуют совокупное изменение показателя $П_1/П_2$ при уменьшении (увеличении) отношения средневзвешенных удельных расходов (P_q), вновь образованных поверхностей кусков разрушенной породы ($P_{др}$), глубины перебуров ($P_п$), выхода взорванной породы с 1 т.м. скважины ($P_в$). Наличие в настоящее время объективных расчетных методик оценки влияния основных факторов на эффективность взрывной отбойки позволяет повысить надежность используемого метода расчета показателя $П_1/П_2$.

В качестве примера далее определена величина показателя $П_1/П_2$ для пары: эмульсионное ВВ ВЭТ 300 ($П_1$) и штатное ВВ граммонит 79/21 ($П_2$). Объект разрушения по-прежнему руда кальцит магнетитовая с апатитом и форстеритом. Расчеты основных параметров взрывной отбойки удлиненными скважинными зарядами выполнены на базе ранее разработанной автором методики и представлены в табл. 3.

Расчеты выполнены для скважен диаметром d = 320 мм при высоте уступа H = 15 м.

Из табл. 3 следует, что основные показатели отбойки для ВЭТ 300 уступают аналогичным показателям, достигаемым при применении граммонита 79/21 (за исключением среднего диаметра куска взорванной породы). В обоих случаях

Таблица 3

№	ВЭТ 300	Граммонит 79/21
1	$e_п = 0,81$	$e_п = 1$
2	$U/U_Э = 0,52$	$U/U_Э = 0,82$
3	$\lambda_р = 4,24$	$\lambda_р = 4,88$
4	$K_п = 2,38$ кг/м³	$K_п = 1,93$ кг/м³
5	$\beta_{ср} = 0,27$	$\beta_{ср} = 0,24$
6	$l_{заб} = 4,5$ м	$l_{заб} = 4,7$ м
7	$q_{св} = 1,43$ кг/м³	$q_{св} = 1,26$ кг/м³
8	W = 8 м	W = 8,4 м
9	$d_{ср} = 0,35$ м	$d_{ср} = 0,35$ м
10	$l_п = 3,6$ м	$l_п = 2,94$ м
11	B = 48,71 м³/м	B = 51,72 м³/м

$d_{ср}$ = 0,35 м). В соответствии с данными таблицы3 получим: P_q = 1,26/1,43 = 0,88, коэффициент $P_{др}$ = 0,35²/0,35² = 1 (площадь вновь образованной при разрешении породы поверхности кусков обратно пропорциональна $d_{ср}^2$), коэффициент $P_п$ = 2,94/3,6 = 0,82, а $P_в$ = 48,71/51,78 = 0,94. В результате получим:

$$П_1/П_2 = P_q \cdot P_{др} \cdot P_п \cdot P_в =$$

$$=0,88 \cdot 1 \cdot 0,82 \cdot 0,94 = 0,68$$

Проведенные расчеты показывают, что эмульсионное взрывчатое вещество ВЭТ 300 по совокупному влиянию основных параметров, определяющих эффективность взрыва, почти в 1,5 раза уступает граммониту 79/21. Преимущества ВЭТ 300 по сравнению с 79/21 – меньшая стоимость и меньший объем, вредных газов взрыва. Только развернутый технико-экономический анализ позволит установить достаточно ли этих преимуществ, чтобы в рассмотренном случае решить проблему выбора ВВ в пользу ВЭТ 300. Основой такого анализа является предложенная в статье методика определения реальной относительной работоспособности взрывчатых веществ.

Выводы

1. Обоснована и разработана методика оценки эффективности ВВ на основе сочетания двух взаимно дополняющих критериев. Ими являются ранее известная относительная потенциальная $e_п$, а также предложенная автором относительная реальная работоспособность $U/U_Э$ исследуемого ВВ.

2. Получена формула для расчета $U/U_Э$, относительной реальной работоспособности взрывчатых веществ, на основе $e_п$ и скорректированных представлений о параметрах взрываемости горных пород.

3. Использование установленных соотношений, с одной стороны, позволит на более высоком уровне решить в конкретных условиях взрывных работ проблему выбора оптимальной пары « ВВ – порода». А, с другой стороны, внести значительный вклад в решение проблемы сертификации ВВ по работоспособности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасенков А.Н., Котова Л.И., Кукиб Б.Н.* О работоспособности промышленных взрывчатых веществ. Физика горения и взрыва, 2001, т.37, №3. С. 115-125

2. Тарасенко В.П. Квантование размеров кусков и гранулометрия разрушения при взрыве. Доклады АН СССР, 1990 г., т.315, №2. С. 323-326.

3. *Тарасенко В.П.* Новое в оценке сравнительной эффективности ВВ при уступной отбойке. Материалы международной конференции «Взрывное дело – 99». Издательство Московского государственного горного университета, 1999, с. 211-218. ГИАБ

Коротко об авторах

Тарасенко В.П. – доктор технических наук, профессор, Московский государственный горный университет.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.А. Белин.*