Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXVI, вып. 1, 1958 г.

О ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ОТ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ ОДИНОЧНОГО ЗАРЯДА РЫХЛЕНИЯ

Ю. М. МИСНИК

Дальнейшее осуществление грандиозных задач мирного развития народного хозяйства СССР требует еще более широкого использования энергии взрывчатых веществ при разработке месторождений полезных ископаемых в области промышленного, железнодорожного и гидротехнического строительства и в других отраслях хозяйства.

Между тем вопрос определения величины зарядов ВВ до сих пор разработан далеко не достаточно, а существующие способы расчета зачастую дают неверные результаты.

Наибольшее распространение для расчета зарядов рыхления в настоящее время получили формулы следующего вида:

$$Q = f(n)\, q\, W^3 \ кг, \tag{1}$$

где q — удельный расход ВВ, $кг/м^3$;

W — линия наименьшего сопротивления (ЛНС), $м$;

$f(n)$ — коэффициент, учитывающий зависимость удельного расхода ВВ от величины ЛНС или показателя действия взрыва.

Эти формулы предусматривают единую закономерность изменения удельного расхода ВВ (как в зависимости от ЛНС, так и в зависимости от величины показателя действия взрыва), независимо от физико-механических свойств взрываемой среды.

Предложенные в последнее время формулы для расчета величины зарядов рыхления типа

$$Q = q\, W^3 \left(a + \frac{b}{W}\right) кг \tag{2}$$

хотя и предполагают наличие определенной закономерности между характером изменения удельного расхода ВВ и физико-механическими свойствами взрываемой среды, но не нашли применения в практике взрывных работ. Это объясняется прежде всего тем, что значения входящих в эту формулу коэффициентов a и b, определяющих закономерность изменения удельного расхода ВВ относительно ЛНС и зависящих от физико-механических свойств взрываемой среды, остаются не известными для различных горных пород. Кроме того, они не учитывают изменение удельного расхода ВВ в зависимости от величины показателя действия взрыва.

Основные задачи исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, и сводились главным образом к экспериментальному определению закономерности изменения удельного расхода ВВ в зависимости от величины ЛНС и показателя действия взрыва для одиночных сосредоточенных зарядов рыхления.

Под зарядами рыхления понимаются такие заряды, в результате взрыва которых преследуется цель дробления среды до определенной степени. Показатель действия взрыва таких зарядов (отношение радиуса воронки взрыва к ЛНС) может быть как меньше, так и больше единицы в зависимости от требуемой степени дробления, измеряемой средневзвешенным диаметром кусков взорванной среды.

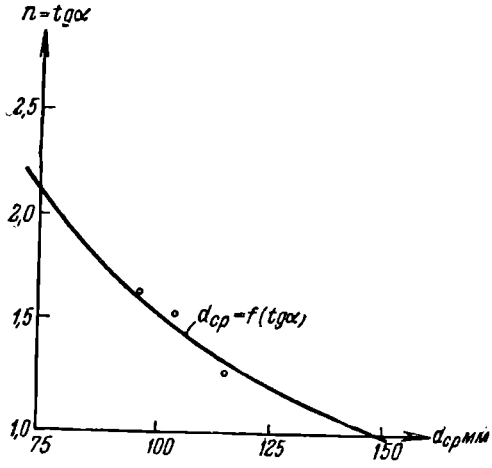


Рис. 1. Зависимость средневзвешенного диаметра кусков породы от показателя действия взрыва (по данным Ю. В. Тогунова)

Для установления функциональной зависимости степени дробления взорванной среды от величины показателя действия взрыва были обработаны результаты экспериментальных исследований Ю. В. Тогунова [10]. Анализ этих результатов позволяет сделать вывод о наличии обратной зависимости между показателем действия взрыва n и средневзвешенным диаметром кусков взорванной среды $d_{ср}$ (рис. 1)

$$d_{ср} = \frac{D}{n} \text{ мм}, \qquad (3)$$

где D — средневзвешенный диаметр кусков взорванной среды при $n = 1$ *мм*. Для мрамора $D = 150$ *мм*.

Можно предполагать, что характер закономерности останется неизменным и для других горных пород изменится лишь величина коэффициента D. Для определения значений D для других горных пород необходимо провести соответствующие эксперименты в конкретных горных породах.

Следовательно, при постоянном значении показателя действия взрыва при любых ЛНС можно с достаточной для практики точностью полагать постоянной и степень дробления взорванной среды.

На характер изменения удельного расхода ВВ в зависимости от ЛНС наиболее существенное влияние при прочих равных условиях оказывают силы сцепления и инерции взрываемой среды. Исходя из этих соображений, в качестве горных пород для постановки экспериментов были приняты влажный песок, суглинистый грунт, апатит и гранит, т. е. горные породы, физико-механические свойства которых резко отличны (табл. 1).

Для каждой горной породы производилось несколько серий взрывов различными по величине зарядами ВВ, при различных значениях ЛНС для каждой серии. В качестве постоянных условий для каждой серии взрывов были приняты: сорт ВВ, форма заряда, способ инициирования, плотность заряжения, качество забойки и физико-механические свойства горной породы.

Таблица 1

Некоторые физико-механические свойства исследуемых горных пород

Характеристика	Влажный песок	Суглинок	Апатит	Гранит
Объемный вес, *кг/м³*	1520	1830	2880	2820
Влажность, %	41,1	17,1	—	—
Временное сопротивление сжатию, *кг/см²*	—	—	870	2000
Класс по единой шкале буримости и взрываемости	XVI	XII	IX	VI

Примечание. В таблице даны средние значения характеристик горных пород.

Результаты каждого взрыва фиксировались замером диаметра образующейся воронки взрыва и вычислением удельного расхода ВВ и угла раствора воронки взрыва. Величина заряда ВВ для различных серий взрывов изменялась от 0,0013 до 0,150 *кг*, число серий взрывов для различных горных пород от 4 до 7, число взрывов в каждой серии от 3 до 9, не считая повторных, при изменении ЛНС от 2 до 60 *см*. Всего в процессе экспериментирования было произведено свыше 250 взрывов.

Некоторые результаты экспериментальных исследований во влажном песке, суглинистом грунте, апатите и граните приведены в табл. 2—5.

Как показывают кривые рис. 2, построенные на основании данных табл. 4, с увеличением глубины заложения одного и того же заряда удельный расход ВВ сначала более, а затем менее интенсивно уменьшается. Графически это выражается кривой гиперболического типа.

Кривые, характеризующие зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС при различной величине заряда ВВ в апатите, образуют семейство кривых гиперболического типа. Следовательно, абсолютная величина заряда ВВ не оказывает влияния на характер закономерности изменения

Таблица 2

Зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС и *n* по данным экспериментальных взрывов во влажном песке

W, *см*	Удельный расход ВВ и показатель действия взрыва при *Q*, *г*									
	1,3		2,6		3,9		5,2		6,5	
	q, *кг/м³*	*n*	*q*, *кг/м³*	*n*	*q*, *кг/м³*	*n*	*q*, *кг/м³*	*n*	*q*, *кг/м³*	*n*
2	9,38	4,07	13,10	4,88	18,75	5,00	—	—	—	—
4	2,62	2,72	3,71	3,24	4,32	3,68	4,93	3,98	4,95	4,33
6	1,32	2,09	1,75	2,57	2,08	2,89	—	—	—	—
8	0,84	1,70	1,11	2,10	1,28	2,40	1,44	2,60	1,60	2,77
10	0,63	1,41	0,76	1,81	0,90	2,05	—	—	—	—
12	0,48	1,23	0,59	1,56	0,68	1,78	0,75	1,96	0,82	2,10
14	0,34	1,16	0,48	1,37	0,54	1,60	—	—	—	—
16	0,31	0,99	0,42	1,20	0,47	1,40	0,50	1,56	0,54	1,68
18	Камуфлет		0,39	1,05	0,41	1,26	—	—	—	—
20	—	—	0,36	0,92	0,37	1,12	0,39	1,26	0,41	1,38
22	—	—	Камуфлет		0,35	1,00	—	—	—	—
24	—		—	—	0,34	0,89	0,34	1,04	0,34	1,15

Таблица 3

Зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС и n по данным экспериментальных взрывов в суглинистом грунте

W, *см*	Удельный расход ВВ и показатель действия взрыва при Q, *кг*							
	0,02		0,04		0,06		0,08	
	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n
10	3,41	2,37	4,61	2,89	5,50	3,23	6,26	3,49
15	1,67	1,84	2,23	2,26	—	—	—	—
20	1,08	1,49	1,38	1,86	1,62	2,10	1,86	2,29
25	0,77	1,26	—	—	—	—	—	—
30	0,70	1,08	0,74	1,38	0,87	1,57	0,96	1,72
40	Камуфлет		0,51	1,08	0,57	1,25	0,63	1,38
50	—	—	Камуфлет		0,44	1,03	0,47	1,14

Таблица 4

Зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС и n по данным экспериментальных взрывов в апатите

W, *см*	Удельный расход ВВ и показатель действия взрыва при Q, *кг*									
	0,02		0,04		0,06		0,08		0,10	
	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n
10,0	—	—	—		7,85	2,70	—	—	—	
10,5	4,57	1,90		—	—	—	—	—		—
12,0	—	—					6,37	2,65	—	—
12,5	3,46	1,68	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	3,90	2,00	4,59	2,26	—	—	5,61	2,64
15,0	—	—	3,30	1,86	—	—			—	—
18,0	2,07	1,26	—	—	—	—	—	—	—	—
18,5	—	—		—	2,67	1,83	—	—	3,28	2,15
20,5					2,39	1,73	2,55	1,87		—
22,0	—	—	—	—	—	—	2,28	1,78	—	—
24,0	1,54	0,95	1,69	1,32		—	—	—	2,14	1,80
26,5	—	—	1,58	1,18	—	—			—	—
30,5		—	—	—	1,34	1,23				—
36,0					1,10	1,06	—	—		
38,0			—		—	—	1,12	1,12	—	—
41,0		—		—			1,06	1,04	1,09	1,14
45,0	—	—	—	—	—		—	—	0,99	1,03

Таблица 5

Зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС и n по данным экспериментальных взрывов в граните

W, *см*	Удельный расход ВВ и показатель действия взрыва при Q, *кг*					
	0,060		0,10		0,15	
	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n	q, *кг/м³*	n
10,0	10,30	2,36	12,81	2,73	15,40	3,05
12,0	7,57	2,10	9,27	2,45	—	—
18,0	—	—	4,58	1,90	5,36	2,15
19,0	3,56	1,53	—	—	—	—
20,0	—	—	3,86	1,76	4,48	2,00
25,0		—	—	—	3,31	1,77

удельного расхода ВВ в зависимости от ЛНС при постоянной величине заряда рыхления.

Наряду с изменением ЛНС, происходило изменение и угла раствора воронки взрыва, так как величина заряда ВВ для каждой серии взры-

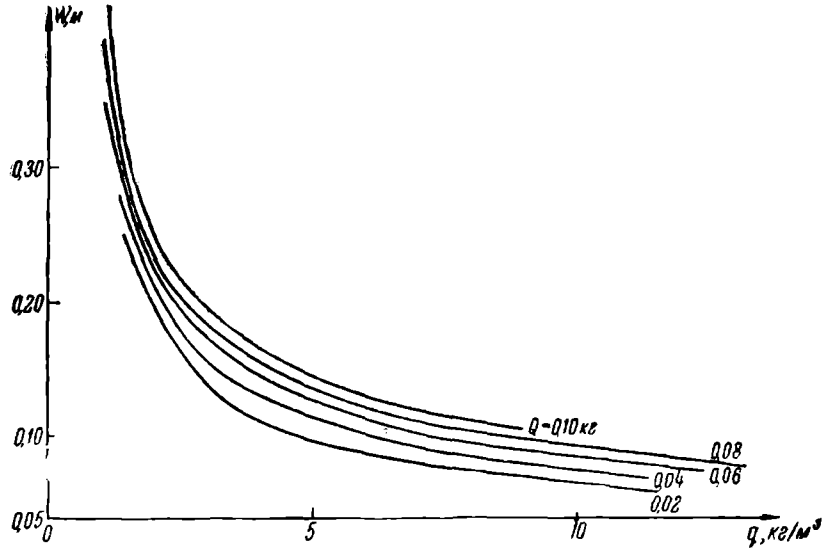


Рис. 2. Зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС при $Q = \text{const}$ в апатите

вов принималась постоянной. Изменение удельного расхода ВВ в зависимости от n для различных величин зарядов в апатите графически представлено на рис. 3.

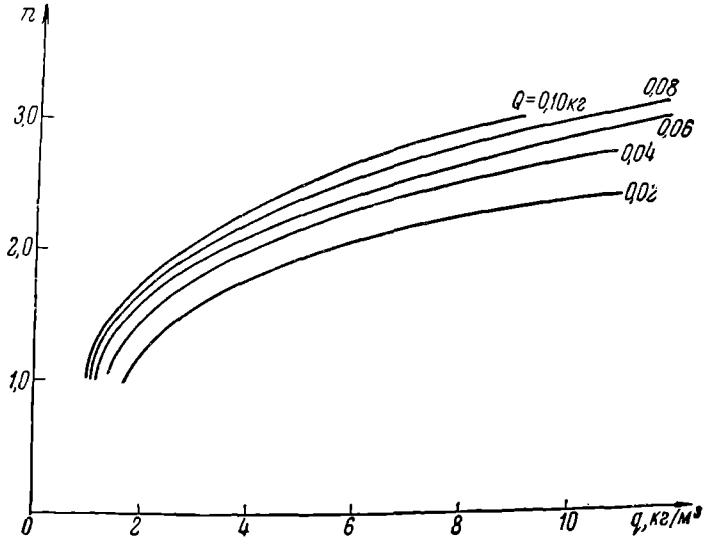


Рис. 3. Зависимость удельного расхода ВВ от угла раствора воронки взрыва при $Q = \text{const}$ в апатите

Кривые, характеризующие зависимость удельного расхода ВВ от n при различных величинах заряда ВВ, образуют семейство кривых параболического типа. Следовательно, и в этом случае абсолютная ве-

личина заряда ВВ не оказывает влияния на характер данной зависимости.

На рис. 2, 3 приведены зависимости $q = f(W)$ и $q = f(n)$ по данным экспериментальных взрывов в апатите. Для других исследованных горных пород характер указанных закономерностей полностью сохраняется.

Дальнейшая обработка результатов экспериментальных исследований позволила установить зависимость величины заряда рыхления от угла раствора воронки взрыва при $W = \text{const}$ (табл. 6).

Таблица 6

Зависимость относительного изменения величины заряда от угла раствора воронки взрыва при $W = \text{const}$

n	Относительное значение величины заряда			
	влажный песок	суглинок	апатит	гранит
1,00	1,00	1,00	1,00	—
1,20	1,45	1,47	1,59	—
1,40	2,23	2,16	2,26	2,17
1,60	3,23	3,28	3,26	3,18
1,80	4,45	—	4,41	4,47
2,00	6,24	—	6,26	6,25

Как видно из кривой рис. 4, построенной на основании данных табл. 6, зависимость величины заряда рыхления от угла раствора воронки взрыва одинакова для всех исследованных горных пород. Как известно, эти породы достаточно резко отличаются друг от друга физико-механическими свойствами и охватывают значительный интервал горных пород, классифицируемых по взрываемости. Следовательно, закон изменения величины заряда рыхления (а стало быть и удельного расхода ВВ) в зависимости от угла раствора воронки взрыва одинаков для любых горных пород независимо от их физико-механических свойств.

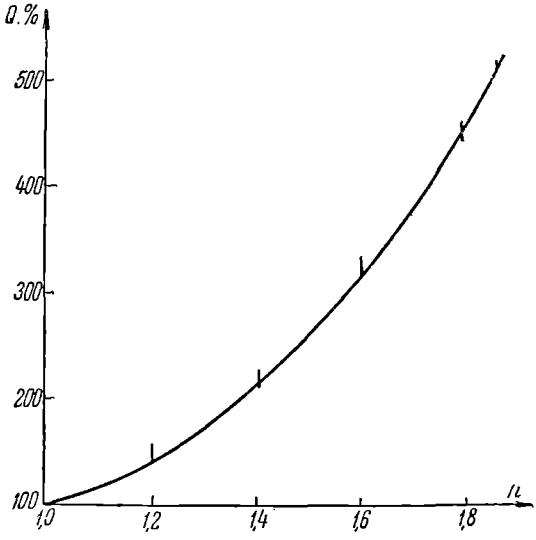


Рис. 4. Зависимость относительного изменения величины заряда ВВ от угла раствора воронки взрыва

Как следует из анализа кривой рис. 4, зависимость удельного расхода ВВ от показателя действия взрыва с достаточной для практики точностью может быть выражена формулой

$$q_n = \frac{(n^2+1)^2}{4n^2} q \quad кг/м^3, \qquad (4)$$

где q — удельный расход ВВ при $n = 1$, $кг/м^3$;

q_n — удельный расход ВВ при показателе действия взрыва, равном n, $кг/м^3$.

В результате обработки графическими методами данных, представленных в табл. 2—6, получены также закономерности изменения удельного расхода ВВ от величины ЛНС при $n = 1$ для всех горных пород, подвергнутых экспериментальным исследованиям (табл. 7, рис. 5).

Таблица 7

Изменение удельного расхода ВВ в зависимости от ЛНС при $n = 1$

ЛНС, *м*	Среднее значение удельного расхода ВВ при $n = 1$, *кг/м³*			
	влажный песок	суглинок	апатит	гранит
0,10	0,55	1,77	3,21	5,35
0,12	0,49	1,51	2,76	4,50
0,14	0,44	1,33	2,47	3,96
0,16	0,41	1,18	2,20	3,52
0,18	0,39	1,07	2,00	3,11
0,20	0,37	0,99	1,78	2,82
0,25	—	0,85	1,49	2,31
0,30		0,72	1,30	—
0,35		0,64	1,18	
0,40		0,61	1,00	
0,45		0,55	0,95	
0,50		0,53	—	

Анализ табл. 7 и рис. 5 показывает, что изменение удельного расхода ВВ в зависимости от ЛНС при постоянстве величины n не остается одинаковым для всех исследованных горных пород. Так, при увеличении ЛНС в два раза (с 0,10 до 0,20 *м*) удельный расход ВВ для влажного песка уменьшается в 1,47 раза, для суглинка — в 1,75 раза, для апатита — в 1,82 раза, для гранита — в 1,89 раза.

Изменение удельного расхода ВВ в зависимости от ЛНС проявляется тем резче, чем выше сопротивляемость среды в отношении взрываемости.

В результате аналитической обработки кривых рис. 5 получена формула для определения величины удельного расхода ВВ в зависимости от ЛНС при $n = \text{const}$

$$q_W = q_1 + q_2 \frac{1}{W} = q\left(a + \frac{b}{W}\right) \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

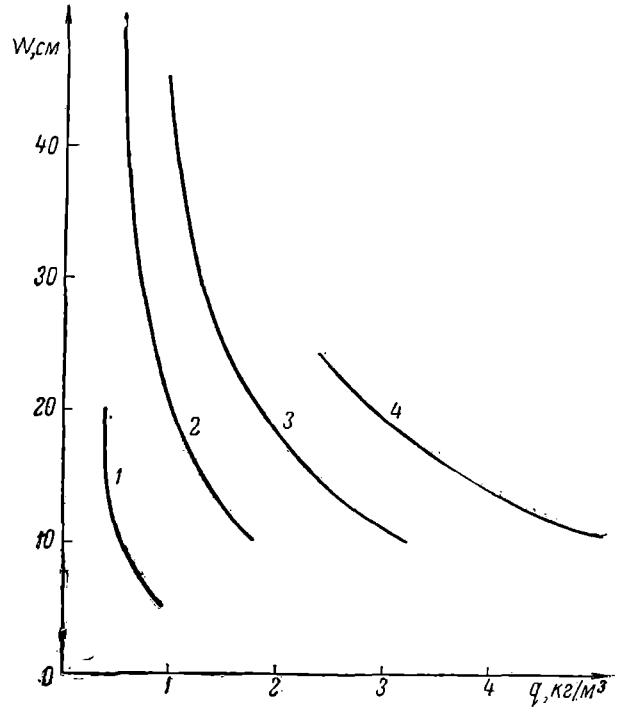


Рис. 5. **Зависимость удельного расхода ВВ от ЛНС при $n = 1$ по данным экспериментальных исследований для:**

1 — песка; *2* — суглинка; *3* — апатита; *4* — гранита

где q_W — удельный расход ВВ при ЛНС $= W$, $кг/м^3$;

q_1, q_2, a, b — коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств среды;

q — удельный расход ВВ при $W = 1$, $кг/м^3$.

Следовательно, зависимость удельного расхода ВВ от глубины заложения заряда и величины показателя действия взрыва может быть выражена формулой

$$q = q_0 \frac{(n^2+1)^2}{4n^2}\left(a + \frac{b}{W}\right) кг/м^3, \qquad (6)$$

где q_0 — удельный расход ВВ при $n = 1$ и $W = 1$, $кг/м^3$

С точки зрения теоретических предпосылок, лежащих в основе формулы (2), коэффициенты a и b выражают относительный расход ВВ соответственно на преодоление сил инерции a и сил сцепления b с учетом сопутствующего дробления взорванной среды. Формула (6) справедлива лишь для одиночных зарядов рыхления, действие взрыва которых проявляется в виде воронки с вершиной в центре заряда.

В табл. 8 приведены значения коэффициентов q_1, q_2, a и b для горных пород, подвергнутых экспериментальным исследованиям, а также значения объемного веса γ и удельного расхода ВВ на преодоление сил инерции одной весовой единицы взорванной среды.

Таблица 8

Значения коэффициентов q_1, q_2, a и b для некоторых горных пород

Горная порода	q_1, $кг/м^3$	a	q_2, $кг/м^3$	b	γ, $т/м^3$	q_1/γ, $кг/т$
Влажный песок	0,171	0,82	0,038	0,18	1,52	0,112
Суглинок .	0,229	0,60	0,152	0,40	1,83	0,125
Апатит	0,340	0,54	0,287	0,46	2,88	0,118
Гранит	0,350	0,44	0,443	0,56	2,83	0,124

Расход ВВ на преодоление сил инерции 1 $м^3$ взорванной среды, как видно из табл. 8, при зарядах рыхления остается практически постоянным (0,12 $кг/м^3$) для всех рассмотренных горных пород независимо от их физико-механических свойств и ЛНС заряда. Следовательно, значение коэффициента q_1 для любых горных пород

$$q_1 \cong 0{,}12\gamma, \; кг/м^3. \qquad (7)$$

Как показывает анализ результатов экспериментального исследования, изменение удельного расхода ВВ при изменении ЛНС для влажного песка (класс XVI ЕШБ и В) при $n = 1$ подчинено выражению

$$q = 0{,}171 + 0{,}038\frac{1}{W}, \; кг/м^3 \qquad (8)$$

Таким образом, величина удельного расхода ВВ, пропорциональная силам инерции, для влажного песка равна $q_1 = 0{,}171$ $кг/м^3$ и величина удельного расхода ВВ, пропорциональная силам сцепления, $q_2 = 0{,}038$ $кг/м^3$. Соответственно для влажного песка $a = 0{,}82$; $b = 0{,}18$. Объемный вес влажного песка равен 1,52 $т/м^3$.

При переходе от наиболее слабых к наиболее крепким по взрываемости горным породам объемный вес пород увеличивается примерно

в 2,2—2,5 раза, а удельный расход ВВ возрастает примерно в 20 раз. Тогда для пород класса I единой классификации величина

$$a = \frac{0{,}82 \cdot 2{,}5}{20} = 0{,}10. \qquad (9)$$

Следовательно, для наиболее слабых и наиболее трудновзрываемых пород величина коэффициента a изменяется в пределах

$$a = (0{,}82 \div 0{,}10). \qquad (10)$$

Соответственно для пород классов XVI и I единой классификации

$$b = (0{,}18 \div 0{,}90). \qquad (11)$$

Значения коэффициентов a и b, полученные экспериментально, достаточно хорошо совпадают с результатами теоретических исследований С. Д. Основина [2].

Для пород, близких друг к другу по своим свойствам и относящимся к соседним классам единой классификации, изменение значений коэффициентов a и b на небольшую величину не влечет грубых ошибок при подсчете величины заряда. Это позволяет все горные породы объединить в семь групп, из которых каждая характеризуется определенными значениями a и b (табл. 9).

Таблица 9

Примерные числовые значения коэффициентов a, b и удельного расхода ВВ для зарядов рыхления применительно к единой классификации горных пород по взрываемости

Классы по единой классификации	Удельный расход ВВ при $n = 1$ кг/м³	Группа породы	a	b
I	3,00	—	—	—
II	2,45	А	0 15	0,85
III	1,92	—	—	—
IV	1,51	—	—	—
V	1,38	Б	0,25	0,75
VI	1,10	—	—	—
VII	0,87	В	0,35	0,65
VIII	0,72	—	—	—
IX	0,54	—	—	—
X	0,45	Г	0,45	0,55
XI	0,36	Д	—	—
XII	0,29		0,55	0,45
XIII	0,21	Е	—	—
XIV	0,19		0,65	0,35
XV	0,18	Ж	—	—
XVI	0,17		0,80	0,20

В табл. 9 примерные значения удельного расхода ВВ даны для одиночных зарядов рыхления в пересчете на аммонит № 6 при одной обнаженной поверхности неограниченных размеров и степени дробления взорванной среды, соответствующей показателю действия взрыва, равному единице.

Выводы

1. Для всех горных пород зависимость удельного расхода ВВ от глубины заложения одиночного заряда рыхления подчиняется закону гиперболы. В то же время с количественной стороны зависимость $q = f(W)$ предопределяется физико-механическими свойствами взрываемой среды. Уменьшение удельного расхода ВВ при увеличении глубины заложения одиночного заряда рыхления проявляется тем резче, чем выше сопротивляемость среды на разрыв, т. е. чем больше часть заряда, расходуемая на преодоление этого сопротивления.

2. С увеличением одиночного заряда рыхления увеличивается показатель действия взрыва и уменьшается размер кусков взорванной среды при неизменной глубине заложения заряда. Для всех горных пород характер зависимости величины заряда рыхления от показателя действия взрыва и степени дробления взорванной среды с качественной и количественной сторон остается неизменным при любых значениях ЛНС, подчиняясь закону параболы.

3. Определение удельного расхода ВВ при расчете одиночных сосредоточенных зарядов рыхления следует производить по формуле (6). Она отражает наблюдаемое в практике взрывных работ уменьшение удельного расхода ВВ, если при увеличении ЛНС показатель действия взрыва, а следовательно, и степень дробления взорванной среды не меняются.

4. Установленные примерные значения коэффициентов a и b (табл. 9), определяющих характер закономерности $q = f(W)$ в зависимости от физико-механических свойств взрываемой среды, позволяют пользоваться формулой (6) при определении значения удельного расхода ВВ практически для любых горных пород.

Изложенные выводы применимы к одиночным сосредоточенным зарядам рыхления и носят предварительный характер. Они, безусловно, должны быть уточнены в процессе проведения дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Использованная литература

1. Мисник Ю. М. Исследование действия взрыва в среде в зависимости от глубины заложения заряда рыхления. Канд. диссертация. Фонды ЛГИ, 1953.
2. Осповин С. Д. Действие сосредоточенных зарядов и их расчет. Сб. Вопросы разработки мощных пластов Кузбасса. Углетехиздат, 1953.
3. Пирсон Дж. и Рейнхарт Дж. Деформация и разрушение толстостенных стальных цилиндров при взрыве. Пер. с англ. В. Зепкевич. Реф. журн. Механика, 1953, вып. 3(19).
4. Покровский Г. И. Исследование удара и взрыва в деформируемых средах. Ч. 1, 2, 3. Изд. ВИА РККА, 1937, 1938, 1940.
5. Рейнхарт Дж. Некоторые экспериментальные данные о напряжениях, вызванных взрывом. Пер. с англ. В. Любимова. Журн. Механика, 1953, вып. 4 (20).
6. Садовский М. А. Опытное исследование механического действия ударной волны взрыва. Труды СИАН СССР, 1945, № 116.
7. Суханов А. Ф. К вопросу о единой классификации горных пород. Углетехиздат, 1947.
8. Суханов А. Ф. К вопросу о новой теории разрушения горных пород взрывом. Московский ин-т цветн. металлов и золота. Юбил. сб., 1950, вып. 20.
9. Терентьев В. И. К вопросу дробления горных пород при взрывных работах. Изв. АН СССР. Серия технических наук, 1950, вып. 2.
10. Тогунов Ю. В. К вопросу о регулировании степени дробления горных пород взрывом. Канд. диссертация. Фонды ЛГИ, 1953.
11. Фролов М. М. Исследование о минных горнах. СПб., 1868.