

ристанні домішок NaCl, MgO, ZnO, уротропіну і карбаміду.

З розглянутих інгібіторів найефективнішим з точки зору стабілізації хімічної реакції, що виникає при підриванні сульфідомісних порід з використанням акватолу, є CaCO₃. Підтвердженням може служити закордонний і вітчизняний досвід ведення підривних робіт у підземних умовах і на відкритих розробках [1]. Зокрема, в умовах Урупського ГЗК (РФ) при розробці мідної руди, що містить 28–32 % мас. піритної сірки [2], домішка карбонату кальцію (крейди) в складі заряду ВР з розрахунку $0,6 \pm 0,05$ % мас. є достатньою для надання ВВ хімічної стабільності.

Таким чином, питання нейтралізації екзотермічної реакції при взаємодії компонентів аміачно-селітряних ВР із сульфідомісними породами деякою мірою можна розв'язати за рахунок уведення до складу ВР інгібуючих домішок типу CaCO₃, NH₄Cl та ін.

1. Галкин В.В., Ветлужских В.П., Павлютенков В.М. Причины разложения и отказов зарядов акватола / Безопасность труда в промышленности. – 1988. – № 10. – С. 47–49.

2. Маслов В.В., Буланцев Ю.А., Сидоренко А.А. и др. Опыт использования пористой гранулированной аммиачной селитры на предприятиях, ведущих взрывные работы / Взрывное дело. – 1991. – № 91/48. – С. 226–230.

УДК 622.235

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ЕГО ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ

А. Воеводка, докт.-инж. (Силезский технический университет, РП)

Наведено аналіз експериментальних даних про співвідношення силових та часових показників хвиль напружень при підводному вибухові зарядів вибухових речовин, які різняться за щільністю та потенціальною енергією.

Повышение эффективности взрывных работ при разрушении горного массива является актуальной задачей. Современные технические и экологические требования к взрывчатым веществам (ВВ) не могут быть обеспечены имеющимся ассортиментом ВВ, методами их изготовления и применения.

Разрушение массива достигается путем создания в нем силовых полей требуемых временных и пространственных параметров. Формирование силовых полей происходит под влиянием начальных параметров внешних нагрузок, вызываемых взрывом на контакте системы заряд–среда, а также вследствие пространственно-временного рассредоточения источников внешних

нагрузок (зарядов) в массиве и регулирования их взаимодействия в требуемых временных диапазонах.

Оптимизация процесса разрушения горных пород немислима, с одной стороны, без учета физико-механических свойств среды и изучения механизма ее поведения под действием энергии взрыва, и, с другой стороны, без совершенствования методов оптимизации параметров последнего применительно к данным конкретным условиям. В настоящее время общепринятым является представление об импульсном характере приложения нагрузки с учетом конечного значения времени, в течение которого происходит передача энергии среде, вместо ранее существовавшего предположения о механизме мгновенной ее передачи окружающему массиву. Данное положение вытекает из современного представления о механизме разрушения горных пород, базирующегося на предпосылке о наличии двух стадий: докритической, на которой происходит зарождение и медленное вязкое подрастание микротрещин, и критической, характеризующейся лавинным ростом трещин. Речь идет, разумеется, об однородном массиве. В блочных структурах механизм разрушения является более сложным. На первой стадии подрастание субкритических трещин связано с движением и взаимодействием микродефектов (дислокаций), которые приводят к образованию микротрещин. В соответствии с теорией Гриффитса необходимым условием разрушения является возникновение трещины, достаточно большой, чтобы процесс стал автокаталитическим. Известно, однако, что при быстром нагружении существует определенный инкубационный период, необходимый для взаимодействия микродефектов. Если время действия нагрузки меньше этого периода, то разрушение породы произойдет лишь при напряжениях, равных ее теоретической прочности (10^2 – 10^3 ГПа) или превышающих ее. Такие давления в реальных условиях нагружения практически недостижимы. Поэтому для эффективного разрушения породы следует стремиться к тому, чтобы время нагружения было больше длительности инкубационного периода.

Из этих соображений видно, что принятая раньше концепция создания ВВ для разрушения крепких горных пород, базирующаяся на стремлении к максимальному повышению бризантности, является ошибочной. Низкий КПД взрыва следует считать прямым следствием несовершенства механизма передачи энергии среде. При быстропотекающих процессах подрастание микротрещин при достаточной энергии происходит равномерно по всему объему массива, а число зарождающихся очагов разрушения возрастает с увеличением скорости их развития. При этом создаются условия для переизмельчения породы в ближней зоне. Чем выше бризантность ВВ, тем сильнее сказывается этот отрицательный фактор. Поэтому и принцип подбора характеристик ВВ на основе равенства импедансов ВВ и среды не оправдал себя на практике, что указывает на необходимость продолжения усилий по разработке методов оптимизации детонационных свойств ВВ. Регулирование параметров взрывного импульса возможно не только путем подбора композиции окислитель–горючее, но и воздействием на них еще на стадии детонации, что исключительно важно при детонации удлинённых зарядов.

Другими словами, детонация заряда должна осуществляться в оптимальном режиме, способном обеспечить увеличение времени приложения импульса к среде за счет расширения зоны химической реакции, регулирования плотности заряда, повышения водоустойчивости ВВ и т.п.

Для изучения вопросов оптимизации взрывных характеристик ВВ в части передачи энергии ВВ окружающей среде рассмотрим зависимость давления на фронте ударной волны (УВ) и величины импульса от плотности ВВ в условиях подводного взрыва ТЭНа при плотности зарядов $0,44\text{--}1,6 \text{ г/см}^3$ [1]. Свойства испытуемых ВВ приведены в табл. 1, а их силовые показатели – в табл. 2.

Опыты проводились в стальном баке. Ударные волны при взрывании ТЭНа и азида свинца измерялись в диапазоне 20–200 радиусов заряда с помощью турмалиновых датчиков. В ближней зоне давление в ударной волне вычислялось по скорости движения ее фронта, фиксируемой прибором СФР.

Таблица 1. Свойства взрывчатых веществ

Наименование ВВ	Характеристика			
	Плотность ρ , г/см ³	Теплота взрыва Q		Скорость детонации D , м/с
		кДж/кг	кДж/л	
ТЭН: прессованный насыпной	1,6	3384	5415	8200–8700
	0,4	3384	1354	–
Вспененные составы: № 1 (пастообразный) № 2 (сыпучий)	1,2	2350	2822	1800
	0,8	2350	1882	3500
Азид свинца (насыпной)	1,6	881	1409	4800
	0,85	881	766	–

Таблица 2. Сравнение силовых показателей при подводном взрыве ВВ различной плотности

Наименование ВВ	Плотность ρ , г/см ³	Силовые показатели	
		Давление на фронте ударной волны в функции расстояния: $P = f(R^0)$	Удельный импульс взрыва: $J^0 = f(R^0)$
ТЭН	1,6–1,2	$P = 22 C/r^3$	$J^0 = 772/(R^0)^{0,92}$
ТЭН	0,4	$P = 12,5 C/r^3$	$J^0 = 1050/(R^0)^{0,92}$
Азид свинца	1,6	$P = 63 C^{2/3}/r^2$	$J^0 = 440/(R^0)^{0,92}$
Азид свинца	0,85	$P = 42 C^{2/3}/r^2$	$J^0 = 475/(R^0)^{0,92}$
Вспененные составы:		Давление на расстоянии 55 радиусов заряда, МПа	Относительный импульс на расстоянии 300 мм
№ 1 (пастообразный)	1,2	3,5	1,43
№ 2 (сыпучий)	0,8	2,48	1,0

При испытании вспененных составов массой 0,65 г максимальное давление было зарегистрировано пьезодатчиком в точке на расстоянии 55 радиусов заряда. Инициирование зарядов ТЭНа и азид свинца осуществлялось взрывом манганиновой проволоочки толщиной 0,05 мм. Масса зарядов ТЭНа изменялась от 0,2 до 2,5 г, азид свинца – от 1,3 до 7 г. Инициирование вспененных смесей производилось электроразрядом с энергией 600 Дж при напряжении разряда 20 кВ.

Обработка результатов экспериментов по подводному взрыванию ТЭНа позволила установить эмпирические зависимости $P(R^0)$ при различных значениях плотности ВВ:

$$\text{при } \rho = 1,6 \text{ г/см}^3 \text{ в диапазоне } 0,053 \leq r/\sqrt[3]{C} \leq 0,11 \quad P = 22 Cr^3; \quad (1)$$

$$\text{при } \rho = 0,4 \text{ г/см}^3 \text{ в диапазоне } 0,084 \leq r/\sqrt[3]{C} \leq 0,11 \quad P = 12,5 Cr^3. \quad (2)$$

При взрывании вспененных составов давление фиксировалось в точке на расстоянии 300 мм и составило 3,5 МПа при $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ и 2,48 МПа при $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$.

Эмпирические формулы при взрывании азид свинца имеют вид:

$$\text{при } 0,06 \leq r/\sqrt[3]{C} \leq 0,2 \quad P_{1,6} = 63 C^{2/3}/r^2; \quad (3)$$

$$\text{при } 0,07 \leq r/\sqrt[3]{C} \leq 0,18 \quad P_{1,6} = 42 C^{2/3}/r^2. \quad (4)$$

Данные по изменению приведенного импульса взрыва $J^0 = J/C^{1/3}$ кгс/м²/кг^{1/3} в функции приведенного расстояния $R^0 = r/C^{1/3}$ содержатся в табл. 2.

Временные характеристики импульсов при взрывании вспененных составов следующие:

$t = 16$ мкс при взрывании состава № 1 (аммиачной селитры (АС) – 90 %, А1 – 5 %, сульфанола – 5 %);

$t = 16,2$ мкс при взрывании состава № 2 (АС – 90 %, А1 – 5 %, сульфанола – 5 %, воды – 10 % сверх 100 %). Таким образом, соотношение импульсов выражается как $J_{1,2}/J_{0,8} = 16,2 \cdot 3,5/16 \cdot 2,48 = 1,43$.

Анализируя изложенные выше экспериментальные данные, необходимо отметить следующее обстоятельство. В литературных источниках в разное время приводились разноречивые данные о влиянии некоторых характеристик ВВ на параметры ударной волны. В частности М.А. Садовский утверждал, что в пределах скорости детонации от 3700 до 7700 м/с сила ударной волны не зависит от скорости детонации. В других, более поздних работах утверждается, что «взрыв 8 кг заряда гексогена (скорость детонации 8300 м/с, теплота взрыва 1500 ккал/кг) производит волну в 1,6 раза большего давления, чем взрыв такого же заряда тротила (скорость детонации тротила 6900 м/с, прессованного 6000 м/с, теплота взрыва 1010 ккал/кг)» [2]. Увеличение давления в УВ при взрыве гексогена – это экспериментально установленный факт. Из теории детонации известно, что давление в точке Жуге вычисляется из соотношения

$$P = \rho_{II} D^2/4 \quad (5)$$

Применяя принцип энергетического подобия, для сравнения этого параметра запишем $\Delta P_I/\Delta P_{II} = \sqrt[3]{Q_I}/\sqrt[3]{Q_{II}} = \sqrt[3]{1500/1010} \cong 1,15$, т.е. не учитывать

разницу в скоростях детонации, как это имеет место при энергетическом подобии, непропорционально.

Если плотность гексогена P_1 принять равной $1,8 \text{ г/см}^3$, а плотность тротила $P_2 = 1,62 \text{ г/см}^3$ [3], то соотношение давлений, вычисленных по формуле (5), составит $P_1/P_2 = 1,607$, т.е. полностью совпадет с экспериментальными данными. В работе [3] приводятся значения давления на фронте УВ, возникающей при взрыве зарядов гексогена и тротила, равные соответственно 390 и 212 кбар. Согласно этим данным, соотношение $P_1/P_2 = 1,84$, т.е. на 14 % превышает наши расчеты, что вполне допустимо, учитывая разность данных по плотности и скорости детонации ВВ в литературных источниках. Таким образом, для сравнения детонационных характеристик ВВ различной плотности может быть использовано соотношение (5), которое позволит дать качественную оценку результатам. Анализируя данные табл. 2, можно сделать следующие выводы.

1. При взрывании ТЭНа плотностью $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$ давление на фронте УВ в 1,76 раза ниже, чем при $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$; при взрывании азида свинца плотностью $\rho = 0,85 \text{ г/см}^3$ этот показатель в 1,5 раза ниже, чем при $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$. Вспененные составы плотностью 0,8 и $1,2 \text{ г/см}^3$ на расстоянии 55 радиусов заряда различаются по этому показателю в 1,41 раза. Давление при взрыве ТЭНа максимальной плотности более чем в 10 раз выше, чем при взрыве азид свинца плотностью $0,85 \text{ г/см}^3$.

2. Сравнение значений удельного импульса в функции приведенного расстояния показывает, что с уменьшением плотности ВВ величина удельного импульса возрастает: у ТЭНа в 1,36 раза, у азид свинца на 11 %. При взрыве вспененных составов различной плотности значение импульса в точке измерения в 1,43 раза выше у более плотного ВВ, что, очевидно, объясняется резким, почти двукратным, ростом скорости детонации.

3. Из данных табл. 1 и 2 можно также сделать вывод о влиянии энергетических характеристик ВВ на их силовые параметры. Так, объемное соотношение теплоты взрыва ТЭНа и азид свинца плотностью $1,6 \text{ г/см}^3$ равно $5415/1409 = 3,8$, а у малоплотных их разновидностей – $1354/766 = 1,77$. Параметры импульса для таких же значений плотности различаются в первом случае в 1,75 раза, во втором – в 2,2 раза. Таким образом, наряду с плотностью существенная роль в формировании параметров взрывного импульса принадлежит энергетическому показателю.

1. *Вовк А.А., Воеводка А., Кужея Е.* Некоторые проблемы экологии в горнодобывающей промышленности. – Киев: НТУУ КПИ, 1996. – Ч. 1. – 64 с.

2. *Вовк А.А., Кравец В.Г., Демещук Л.И.* Некоторые проблемы детонации смесевых ВВ. Промышленные взрывчатые вещества и средства их инициирования // Сб. материалов I Украинской научной конференции. – Шостка, 1995. – С. 69 – 76.

3. *Турута Н.У., Лучко И.А., Поплавский В.А.* Взрыв и его мирные профессии. – Киев: Наук. думка, 1982. – 174 с.