

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Садовский.— В кн.: Физика взрыва, № 1. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
2. Г. И. Покровский. Взрыв. М.: Недра, 1980.
3. L. Deffet, R. Rucquoi, V. Wouwer. Actes du 2 Congress internat. photographie et cinematographie ultrarapides. Paris, Dunod, 1956.
4. R. A. Strehlow, W. E. Baker. Prog. Energy Combust. Sci., 1976, 2, 1.
5. I. M. Dewey, D. I. McMillin. J. Fluid Mech., 1977, 81, 4.
6. А. Ф. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
7. Ю. И. Рябинин, И. И. Тамм.— В кн.: Физика взрыва, № 5. М.: Изд-во АН СССР, 1956.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВВ

К. К. Шведов

(Черноголовка)

Механическая работа, которую совершает взрыв над окружающей средой, проявляется в различных формах и зависит от многих факторов. Различают [1] бризантные формы работы взрыва, которые непосредственно связаны с параметрами фронта детонационной волны, и фугасные формы, определяемые в основном работой расширения продуктов детонации. Все виды механической работы взрыва существенно зависят от свойств среды и механизма ее разрушения взрывом, а также технологии ведения взрывных работ. Многообразие форм и влияющих на работу взрыва факторов означает, что в принципе невозможно создать единый метод определения относительной работоспособности, основанный на регистрации какого-либо действия на выбранную среду. По этой причине в настоящее время для оценки эффективности ВВ используется ряд экспериментальных методов (свинцовая бомба, баллистический маятник, баллистическая мортира, воронки выброса грунта, давление воздушной волны, обжатие свинцовых столбиков, удельный расход и т. п.) [2]. Эти методы имеют определенные недостатки, связанные, главным образом, с ограниченностью условий испытаний и несоответствием их реальным условиям работы взрыва [3—6].

В работе [7] отмечалось, что к настоящему времени стало возможным и реальным получать экспериментальные данные не только по скорости детонации, но и массовой скорости, давлению и показателю политропы продуктов детонации. Если указанные характеристики определены в идеальных или близких к ним режимах детонации, то они являются характеристиками ВВ, несвязанными с влиянием окружающей среды. Эти характеристики абсолютны и могут быть использованы для расчета различных форм работы взрыва и относительной характеристики эффективности ВВ. В частности, большой интерес представляет оценка той части работы взрыва, которая связана с расширением продуктов детонации (ПД). Согласно [8], идеальная работа расширения газов определяется по выражению

$$A = Q[1 - (V_1/V_2)^{\gamma-1}], \quad (1)$$

где Q — теплота взрыва; V_1 и V_2 — начальный и конечный объем газов; γ — показатель политропы идеального газа.

Реальная работа расширения может быть рассчитана численно

$$R = -\int p d\rho/\rho^2, \quad (2)$$

исходя из известных параметров детонации и уравнения состояния ПД. Основная трудность в вычислении работы расширения ПД состоит в получении такого уравнения состояния, которое описывало бы поведение продуктов детонации на всех стадиях расширения от давления детонации до атмосферного. Знание одних параметров детонации в точке Жуге (p_1, U_1, ρ_1, n) для этих целей недостаточно. Однако для относительной

характеристики различных ВВ можно воспользоваться частью полной работы, задавшись определенной степенью расширения. Удобно выбрать такую степень расширения, чтобы при вычислении R вместо полного уравнения состояния использовать политропическую зависимость $p = A(\rho/\rho_1)^n$ с постоянным значением показателя политропы ПД n , определенным в точке Жуге. В этом приближении получается простое аналитическое выражение для работы расширения ПД

$$R = U_1^2 n / (n - 1) [1 - (\rho/\rho_1)^{n-1}], \quad (3)$$

которое очень похоже на формулу расчета идеальной работы взрыва. Однако в нем учтены химические потери и вместо теплоты взрыва фигурирует полная энергия единицы массы ПД в точке Жуге (U_1^2). Поскольку все величины определяются экспериментально, вычисление работы расширения ПД не составляет трудностей. Основная сложность состоит в обоснованном выборе степени расширения. С одной стороны, она должна быть не слишком большой, чтобы показатель политропы продуктов детонации можно было считать постоянным, и чтобы возможные ошибки за счет его изменения были минимальны. С другой стороны, степень расширения должна быть достаточна, чтобы расчетная часть работы достаточно полно характеризовала работу расширения.

Для обоснованного выбора степени расширения воспользуемся результатами машинных расчетов параметров и работы расширения продуктов детонации гексогена при различных плотностях, выполненных в [9] на основе полученного в [10] уравнении состояния. Это уравнение пригодно для описания поведения ПД гексогена на всех стадиях расширения и имеет общий для конденсированных ВВ вид. Поэтому полученные на его основе результаты будут по крайней мере в качественном отношении справедливы и для других типичных конденсированных ВВ.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости работы взрыва ПД гексогена при расширении из точек Жуге для плотностей зарядов 1,8 (1), 1,5 (2) и 1,0 г/см³ (3) от степени расширения ρ/ρ_1 . Видно, что все кривые подобны. При двукратном расширении работа составляет 60—70% от полной работы (расширение до нулевой плотности). Изменение давления и показателя политропы ПД гексогена (сплошные и штриховые кривые соответственно) указанных плотностей от степени расширения показано на рис. 2. При двукратном расширении давление ПД падает в 6—7 раз, а показатель политропы изменяется на 0,2—0,3, что практически не сказывается на результатах расчетов работы взрыва по формуле (3) и численных расчетов с использованием полного уравнения состояния до степени расширения $\rho/\rho_1 = 0,5$. В табл. 1 приведены результаты вычисления работы взрыва по формуле (3) и численных расчетов до степени расширения $\rho/\rho_1 = 0,5$ и $\rho/\rho_1 = 0$ (соответственно $R_{0,5}$ и R_0).

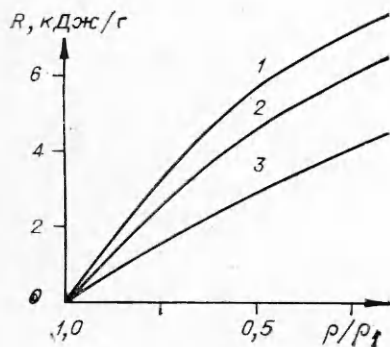


Рис. 1.

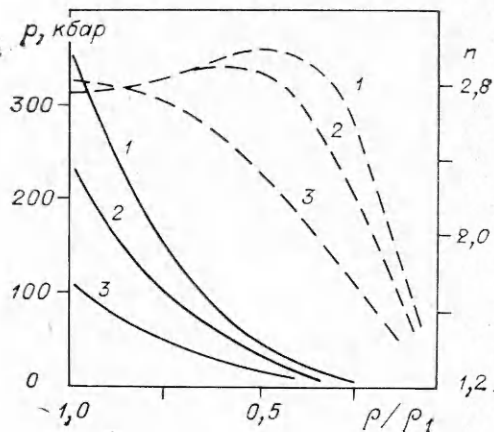


Рис. 2.

Таблица 1

ρ , г/см ³	p_1 , кбар	U_1^2 , (км/с) ²	n	$R_{0,5}$, кДж/г		R_0 , кДж/г	
				по (3)	численный счет	по (3)	численный счет
1,8	348	5,16	2,75	5,62	5,75	8,0	8,3
1,5	237	4,18	2,76	4,60	4,65	6,5	7,3
1,0	103	2,66	2,84	2,94	3,00	4,0	4,2

Видно, что значения работы при двукратном расширении $R_{0,5}$, вычисленные двумя методами, отличаются на 1—2%. Ошибка увеличивается до 5—10% при расчетах полной работы расширения. Приведенные данные (см. рис. 1, 2 и табл. 1) показывают, что $R_{0,5}$ может быть принята для сравнительной оценки работоспособности и рассчитана по приближенной формуле (3) с достаточной для инженерных расчетов точностью. Анализ численных данных (см. табл. 1) показывает также, что основной вклад в работу двукратного расширения вносит полная энергия ПД в точке Жуге.

Рассмотрим влияние других функций, входящих в выражение (3), на $R_{0,5}$. На рис. 3 приведен график зависимости функций $\varphi_1 = n/(n-1)$ и $\varphi_2 = 1 - (\rho/\rho_1)^{n-1}$, а также их произведения от показателя политропы продуктов детонации. Видно, что увеличение n приводит к уменьшению φ_1 , тогда как φ_2 растет. В целом преобладающее влияние на произведение обеих функций оказывает φ_2 , и работа $R_{0,5}$ растет при увеличении n . Изменение n от 2,5 до 3,5 мало сказывается на величине $\varphi_1\varphi_2$ (~15%), что и оправдывает использование в расчетах $n = \text{const}$.

В табл. 2 приведены расчетные значения работы расширения по формуле (3) для ряда ВВ и дано сравнение относительных результатов с данными испытаний на работу взрыва в свинцовой бомбе по [2]. Анализ результатов табл. 2 позволяет сделать вывод о достаточно хорошей корреляции обоих рядов относительной работоспособности, несмотря на различные условия испытаний и возможные неточности определения U_1 и n в зарядах ($\bar{a} \rightarrow \infty$) для некоторых ВВ из-за далекой экстраполяции зависимостей соответствующих величин от обратного диаметра заряда.

Таким образом, расчетные и экспериментальные данные показывают, что оценка работоспособности ВВ по формуле (3) до степени расширения 0,5 достаточно обоснована и правильно отражает влияние различных факторов. В частности, из данных табл. 2 следует, что рост начальной плотности и давления детонации почти в 2 раза в водонаполненных зарядах тротила приводит к увеличению работы расширения ПД лишь на 18%. Объясняется это слабым повышением массовой скорости в наполненных зарядах по сравнению с пористыми. Аналогичная ситуация имеет место при увеличении плотности заряда индивидуальных ВВ. Так, из

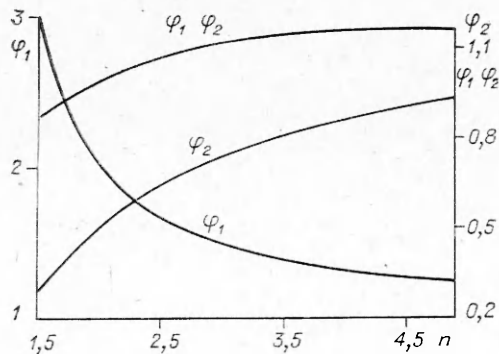


Рис. 3.

приведенных в табл. 1 данных видно, что при изменении плотности гексогена с $\rho_0 = 1,0$ до $1,8$ г/см³ давление детонации растет в 3,4 раза, тогда как работа расширения ПД — в 1,9 раза. Работа расширения ПД является частью механической работы взрыва. Другая часть ее связана с созданием и действием в среде ударных волн, волн напряжения и разрежения. Она в значительной степени определяется начальным давлением детонации и давлением на границе раздела ВВ —

Таблица 2

ВВ	ρ_0 , г/см ³	Q, ккал/кг	p_1 , кбар	Работа взрыва по параметрам детонации					Свинцовая бомба	
				$U_1^2 \left(\frac{R_{\text{мм}}}{c} \right)^2$	n	$\Phi_1 \Phi_2$	R , кДж/г	$R/R_{\text{гекс}}$	R, см ³	R/R _{гекс}
Гексоген *	1,0	1380	107	3,06	2,5	1,07	3,28	1,00	495	1,0
Аммонит скальный № 1	0,95	1290	89	3,24	1,8	0,95	3,08	0,94	450—480	0,91—0,97
Аммонит 6ЖВ	1,0	1030	85	2,9	1,9	0,975	2,82	0,85	360—380	0,72—0,77
Зернограну- лит	1,0	990	68	2,4	1,8	0,95	2,28	0,7	360—370	0,72—0,75
ВГТНТ	1,29	994(1100)	115	2,12	3,1	1,12	2,37	0,72	320	0,65
Аммонит 10ЖВ	0,74	908	55,6	2,40	1,9	0,97	2,32	0,71	300—320	0,6—0,65
Тротил моло- тый	1,0	1000	71,5	1,96	2,6	1,08	2,12	0,65	285—310	0,57—0,62
Гранулиро- ванный ТНТ	1,0	1000	66,5	1,82	2,6	1,08	1,97	0,6	285—295	0,57—0,6
Аммонит ПЖВ-20	1,0	813	68	2,02	2,3	1,05	2,12	0,65	265—290	0,53—0,58
Угленит Э-6	1,0	640	17,5	0,49	2,6	1,08	0,53	0,16	130—170	0,26—0,34

* Заряд $d = 40$ мм, остальное $d \rightarrow \infty$.

среда. Поэтому для полной характеристики относительной эффективности ВВ необходимо знать давление, массовую скорость и показатель политропы ПД, что позволяет вычислять и работу расширения $R_{0,5}$.

В заключение отметим, что в рассматриваемом методе оценки работы расширения ПД предполагается, что разлет продуктов детонации происходит изотропно. Для большинства индивидуальных и смесевых ВВ это оправдано. Сложнее обстоит дело с системами, содержащими активные металлические добавки, которые в большинстве случаев реагируют с дополнительным тепловыделением в расширяющихся продуктах детонации за большие времена, что не учитывается при расчете $R_{0,5}$. Поэтому для правильного учета заведомо фугасных форм работы взрыва в подобных системах целесообразно пользоваться, кроме детонационных характеристик и $R_{0,5}$, одним из прямых экспериментальных методов определения работоспособности, например, по воронкам выброса несвязных грунтов при оптимальной глубине заложения заряда или по объему расширения газовой полости камуфлетного взрыва в воде.

Развитые соображения о связи работоспособности с детонационными характеристиками позволяют более строго подходить к оценке эффективности различных ВВ, унификации номенклатуры ВВ и методов их испытаний.

Поступила в редакцию 29/IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, М. А. Садовский.— В кн.: Физика взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
2. Л. В. Дубнов, П. С. Бахаревич, А. И. Романов. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.
3. Ф. А. Баум. Взрывное дело, № 52/9. М., 1963.
4. В. И. Филатов. Взрывное дело, № 68/25. М.: Недра, 1970.
5. Ю. М. Васильков, Е. Б. Рихтер. Взрывное дело, № 74/31. М.: Недра, 1974.
6. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1978, 14, 2.
7. К. К. Шведов, А. Н. Дремни. Взрывное дело, № 76/33. М.: Недра, 1976.
8. А. Ф. Беляев. Докл. АН СССР, 1944, 45, 164.
9. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1966, 2, 4, 85.
10. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2, 203.