

Металл	k	σ	D, км/с	с. км/с	α, град		
					экспери- мент	расчет по (7)	данные
W	1,80	1,212	7,84	7,19	38,5	35,4	[4]
		1,065	5,04	5,61	44,5	50,0	[4]
		1,017	2,52	6,10	67,0	69,0	[4]
Cu	3,01	1,03	3,3	6,87	64	59,0	Настоящая работа
				5,84			

При предельном сжатии $k\sigma=h$, $\operatorname{tg} \alpha$ стремится к значению $\operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} = 1/\sqrt{h}$. Для металлов $\Gamma_0 \approx 2$, $h=2$, $\operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} = 1/\sqrt{2}$, $\alpha_{\text{пр}} = 35^\circ 16'$. Для сплошного вещества $k=1$, тогда из (7) следует

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{(\sigma - 1)/\sigma(h - 1)}. \quad (8)$$

При $\sigma=1$ $\alpha=0$. При предельном сжатии ($\sigma=h$) $\operatorname{tg} \alpha_{\text{пр}} = 1/\sqrt{h}$. Изменение угла разгрузки со сжатием показано на рисунке (для пористого вещества: $1-h > k$, $2-h < k$; для сплошного вещества: $3-k=1$). Все кривые в точке касания прямой $\sigma=1$ имеют бесконечные производные $d\operatorname{tg} \alpha/d\sigma$.

Сравнение величин, рассчитанных по (4), (6) и (7), с экспериментальными для пористых вольфрама и меди проведено в таблице. Данные для вольфрама заимствованы из работы [4]. Результаты для меди получены в экспериментах по следующей методике. В алюминиевом диске толщиной 6 и диаметром 90 мм с помощью блока ВВ генерируется ударная волна с амплитудой 356 кбар. С диском контактирует образец из пористой меди диаметром 60 и высотой 10 мм. Методом импульсного рентгенографирования получена картина профиля ударной волны в пористом образце. По экспериментальным значениям угла боковой разгрузки определена скорость звука. Из таблицы видно, что значения угла боковой разгрузки, рассчитанные по (7), довольно хорошо совпадают с экспериментом.

Поступила в редакцию
20/X 1976,
после доработки — 18/1 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Райс, Р. Мак-Куин, Дж. Уолш.— В сб.: Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., «Мир», 1965.
2. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
3. А. П. Рыбаков. ФГВ, 1978, 14, 1.
4. К. К. Крупников, М. И. Бражник, В. П. Крупникова. ЖЭТФ, 1962, 42, 3, 675.

О РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич

(Москва)

Одним из распространенных методов определения работоспособности, или фугасного действия, взрыва является метод свинцовой бомбы (проба Трауцля) [1—5]. Стандартная бомба — это цилиндр размером

20×20 см² с осевым отверстием диаметром 2,5 и высотой 12,5 см. Исследуемый заряд массой M=10 г помещался на дно канала бомбы и засыпался сухим кварцевым песком, выполняющим роль забойки. За меру работоспособности ВВ принимается приращение объема полости в кубических сантиметрах за вычетом расширения, производимого детонатором. Этот простой метод, как отмечается в [1], обладает рядом недостатков, из которых наиболее существенно обстоятельство, состоящее в том, что «величина расширения связана с истинной работоспособностью ВВ нелинейной зависимостью». Эта нелинейность проявляется в более быстром росте расширения, чем увеличение энергии ВВ. Это объясняется утоньшением стенок свинцовой бомбы, а следовательно, уменьшением их сопротивления. Кроме того, часть энергии ВВ (как показано ниже, весьма существенная) уносится с продуктами детонации через песчаную забойку, а также расходуется на нагревание песка и свинца за счет тепломассообмена [6]. Последнее приводит к значительному разбросу экспериментальных данных.

В приложении в виде таблицы приведены результаты по пробе Трауцля для некоторых ВВ. Эти данные представлены на рис. 1 в координатах ΔV (расширение в см³), ϵ (энергия ВВ в ккал/кг). Видно, что при одной и той же энергии ВВ работоспособность может различаться в 1,5 раза, а одинаковые работоспособности — при изменении энергии в 2—2,5 раза.

В работе [3] показано, что коэффициент полезного действия взрыва ζ , понимаемый как доля всей энергии ВВ, идущей на механическую работу (включая необходимые потери на трение и ударное сжатие), выражается в виде

$$\zeta = \text{const} \cdot (m/\epsilon)^{0,6} = \text{const}/T, \quad (1)$$

где m — масса продуктов детонации в молях; T — температура продуктов детонации.

Все виды ВВ можно сравнивать, вводя относительный КПД или эквивалент по какому-либо фиксированному ВВ. Например, для тэнового эквивалента в [6] приводится формула

$$\eta = \zeta/\zeta_0 = 10(m/\epsilon)^{0,6} = T_0/T, \quad (2)$$

где индекс 0 относится к тэну. Выражения (1), (2) получены в [3] из анализа экспериментальных взрывов малых зарядов ВВ в песке.

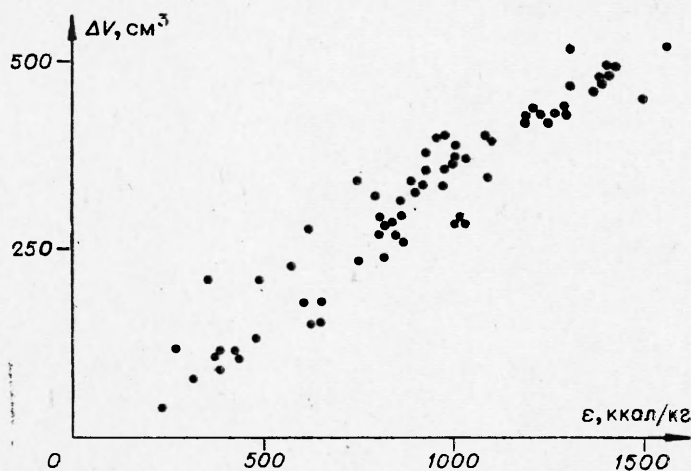


Рис. 1.

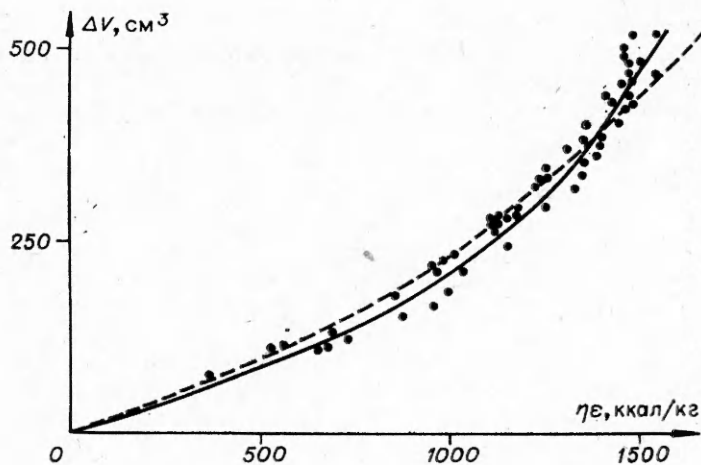


Рис. 2.

Подчеркнем два момента. Во-первых, забойкой в бомбе Трауцля является сухой кварцевый песок. Во-вторых, как показано в [3], формулы (1) и (2) могут оказаться универсальными для любых комбинаций ВВ — среда с соответствующими значениями констант, входящих в (1). Эти соображения дали повод для пересчета данных таблицы и рис. 1, а именно вместо величины ϵ введена величина $\eta\epsilon$. Результат такого пересчета показан на рис. 2. Как видно, разброс существенно уменьшился, что позволило провести через экспериментальные точки кривую, которую можно рассматривать как градуировку метода свинцовой бомбы.

Проведем некоторые вычисления. Заменим цилиндрическую бомбу шаровым слоем эквивалентного объема с внутренним a и внешним радиусом R . Кроме этого допущения, примем, что 1) среда (свинец) несжимаема и 2) среда идеально пластична, так что всюду в области $a \leq r \leq R$ выполняется условие Треска — Мизеса

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = 2\tau_s,$$

где σ_r , σ_{θ} — компоненты тензора напряжений по r и θ ; τ_s — предел текучести (прочности на сдвиг).

Уравнения движения

$$\rho(\partial v/\partial t + v \cdot \partial v/\partial r) = \partial \sigma_r/\partial r + 2(\sigma_r - \sigma_{\theta})/r$$

при условии несжимаемости

$$\rho = \text{const}, \quad v = a^2 \cdot a'/r^2$$

и граничных условиях

$$\sigma_r = -p(a), \quad r = a; \quad \sigma_r = -p_0, \quad r = R$$

может быть проинтегрировано и после некоторых преобразований приведено к виду, выражающему закон сохранения энергии,

$$\int_{a_0}^a p(a) 4\pi a^2 da = \int_{a_0}^a \left(4\tau_s \ln \frac{R}{a} + p_0 \right) 4\pi a^2 da + 2\pi\rho (a^2 \cdot a')^2 \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{R} \right). \quad (3)$$

Здесь ρ — плотность среды; v — радиальная скорость; $p(a)$ — давление на границе полости; p_0 — атмосферное давление; a_0 — начальный радиус полости.

Физический смысл последнего выражения абсолютно ясен: работа, совершаемая газами — продуктами детонации, расходуется на пластическое деформирование материала, работу расширения против давления p_0 и на сообщение телу кинетической энергии.

В момент максимального расширения, который в данном случае соответствует окончанию движения, $a' = 0$, $a = a_m$, и кинетическая энергия — последний член в (3) — равна нулю. В этом случае

$$\int_{a_0}^{a_m} p(a) 4\pi a^2 da = \int_{a_0}^{a_m} \left(4\tau_s \ln \frac{R}{a} + p_0 \right) 4\pi a^2 da. \quad (4)$$

Выражение (4) — точное в рамках сделанных выше гипотез. Перейдем к приближенным вычислениям. Левую часть (4) в соответствии с определением КПД взрыва запишем в виде

$$\int_{a_0}^{a_m} p(a) 4\pi a^2 da = \zeta E,$$

где E — полная энергия ВВ. Из условия несжимаемости и закона сохранения массы получим

$$R^3 - a^3 = 3/4\pi \cdot V,$$

где V — объем свинцовой бомбы. Отсюда при условии $V \gg a^3$

$$R/a = (1 + 3/4\pi \cdot V/a^3)^{1/3} \approx (3/4\pi \cdot V/a^3)^{1/3}.$$

Подставим это выражение в (4) и произведем интегрирование. Тогда, пренебрегая членами, содержащими a_0^3 (по сравнению с a_m^3), получим

$$\zeta E = [4/3 \cdot \tau_s (\ln(V/\Delta V) + 1)] \Delta V, \quad (5)$$

где $\Delta V = \frac{4\pi}{3} (a_m^3 - a_0^3) \approx \frac{4\pi}{3} a_m^3$ — расширение в бомбе Трауцля.

Если масса ВВ равна M , то $E = M\varepsilon$. Вместо ζ подставим выражение из (2); $\zeta = \zeta_0 \cdot \eta$. Величиной p_0 в правой части (5) можно пренебречь и получить

$$\eta \varepsilon = 4/3 \cdot \tau_s / \zeta_0 \cdot 1/M [\ln(V/\Delta V) + 1] \Delta V.$$

Эта зависимость изображена на рис. 2 штриховой кривой при $V = 6,28 \cdot 10^3$ см³, $M = 10$ г и $\tau_s / \zeta_0 = 300$ кг/см². По справочным данным [7] предел прочности на сдвиг, определяемый как половина предела прочности на растяжение, для свинца измеряется в пределах от 60 до 85 кг/см².

Таким образом, коэффициент полезного действия заряда тэна в бомбе Трауцля $\zeta_0 = 20 \div 28\%$. Остальная часть энергии расходуется на нагрев среды и выброс забойки. В принципе можно весь дефицит энергии отнести к кинетической энергии вылетающей забойки. Простой расчет показывает, что скорость забойки должна быть при этом поряд-

Взрывчатое вещество	е. ккал/кг	т*, л/кг	ΔV, см³	тс, ккал/кг
Гексоген	1310	890	520	1535
»	1320	840	475	1490
»	1300	900	465	1530
Гремучий студень	1548	751	520	1470
Тэн	1410	780	500; 490	1450
»	1400	800	480	1460
Детонит 15А-10	1407	778	470; 520	1450
Детонит М	1382	832	460; 500	1490
Аммонит СК-1 (порошок)	1292	830	450; 480	1460
Аквитол М-15	1380	805	465; 480	1480
Аммонит СК-3	1360	810	450; 470	1470
Граммонал А-45	1490	752	440; 460	1450
Динамон АМ-10	1285	840	430; 450	1460
Детонит 10-А	1200	828	430; 450	1400
Детонит 6А	1218	837	425; 440	1420
Динамон АМ-8	1180	843	420; 440	1420
Алюмотол	1260	875	420; 440	1490
»	1463	745	430	1430
Граммонал А-8	1285	860	420; 440	1490
Аммонал водостойчивый	1180	845	410; 430	1420
Гранулит АС-8	1242	847	410; 430	1460
Акванит № 2	1095	853	380; 400	1390
Гранулит АС-4	1080	907	390; 410	1440
Беллит	969	912	400	1390
Аммонит В-3 (порошок)	1000	910	360; 380	1390
Майсит	955	885	400	1350
Аммонит 6	1030	895	360; 380	1380
Акватол 65/35	920	925	380	1350
»	920	925	330; 350	1350
Аммонит 7ЖВ	995	905	360; 370	1380
Аммотол 80/20	1000	800	370	1295
Шнейдерит	921	918	340; 370	1340
Аммоксил	980	908	340; 370	1380
Зерногранулит 50/50В	880	810	340; 350	1240
Тетрил	1090	750	345	1280
Гудронит	813	963	300; 340	1320
Аммонит 10ЖВ	908	924	310; 340	1350
Зерногранулит 30/70В	911	800	330; 340	1240
Победит ВП-4	923	780	320; 340	1225
»	906	770	330	1220
Игданит	900	930	320; 330	1350
Аммонит 9ЖВ	857	933	300; 330	1320
Аммонит 88/12	740	931	340	1250
Гранулит С-2	917	935	320; 330	1360
Аммонит АП-5ЖВ	907	787	320; 330	1225
Нитромочевина	795	850	320	1225
Аммотол 80/20 (30% КСl)	900	800	320	1230
Динамон	800	850	280—300	1220
Гранулотол	1010	750	285; 295	1240
»	880	750	285	1180
Тротил	1030	688	285	1180
Тротил	1010	730	285	1230
Аммонит АП-4ЖВ	864	761	285; 300	1170
Тринитроксол (ксилил)	1000	700	270; 290	1180
Аммонит Т-21	806	724	280	1120
ПЖВ-20	813	717	265; 280	1100
Т-19	814	724	270; 280	1100
Гексамон-5	825	680	280	1080
Мипорит	836	745	265; 280	1145
Нитрат мочевины	610	910	275	1140
Динитробензол	850	717	245—275	1130
Аммотол 80/20 (20% SiO ₂)	800	720	270	1110
Селектит №1	810	760	240	1150
Аммонит серн. 1ЖВ	483	878	200; 220	1020
Аммонит нефт. 3ЖВ	744	635	230; 240	1000
Нитрат мочевины (10% КСl)	568	733	227	980
Аммиачная селитра	346	980	195; 220	955

Взрывчатое вещество	ϵ , ккал/кг	m^* , л/кг	ΔV , см ³	$\eta\epsilon$, ккал/кг
Аммиачная селитра	346	980	165	955
Аммотол 86/14 (20% NaCl)	645	690	180	992
Аммонит А-40	600	551	180	845
Угленит Э-6	640	560	130; 170	870
»	633	552	150	860
Аммонит А-50	487	454	130	680
Угленит № 7	375	527	100; 120	670
»	415	600	110	760
СД-1	267	732	119	724
Азид свинца	381	308	115	550
Гремучая ртуть	405	316	110	515
Тенерес	418	448	110	644
Угленит № 5	311	215	60; 90	367
»	360	215	70	388
»	280	215	70	352
Угленит № 2	380	320	90	505
Угленит Н	230	153	40	266

ка 10^3 м/с, что более чем на порядок превышает наблюдаемые величины. Кроме того, множитель $\eta \sim (m/\epsilon)^{0,6} \sim T^{-1}$, который упорядочивает экспериментальные данные, характеризует тепломассопотери при взрыве [6]. Таким образом, приходится констатировать, что учет последних необходим для адекватного описания явления.

Одна из стандартных характеристик ВВ есть так называемая газовость, т. е. количество газов в литрах, приходящееся на 1 кг ВВ, приведенное к нормальным условиям. Эта величина обозначена в таблице через m^* и связана с m известным соотношением: $m^* = 22,4 m$. Относительная (по тэну) работа взрыва $\epsilon_T = \eta\epsilon$. Подставляя в (2) $m^* = 22,4 m$, получаем

$$\epsilon_T = \eta\epsilon = 1,6m^{*0,6}\epsilon^{0,4},$$

где m^* — газовость ВВ, л/кг; ϵ — удельная энергия; ккал/кг.

Отметим в заключение, что на необходимость оценки работы взрыва при помощи произведения $m^*\epsilon$ указывал в свое время М. Бергло (см. [1]).

Авторы благодарят К. Е. Губкина за внимание к работе.

Поступила в редакцию
27/VI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Дубнов и др. Промышленные взрывчатые вещества. М., «Недра», 1975.
2. Б. Д. Росси, З. Г. Поздняков. Промышленные взрывчатые вещества и средства взрывания. Справочник. М., «Недра», 1971.
3. Л. В. Дубнов.— В сб.: Взрывное дело, № 73/30. М., «Недра», 1974.
4. Г. А. Поляк, Б. И. Вайнштейн.— В сб.: Взрывное дело, № 72/29. М., «Недра», 1973.
5. Б. И. Вайнштейн, Ф. М. Галаджи.— В сб.: Взрывное дело, № 75/32. М., «Недра», 1975.
6. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 6.
7. Дж. Кэй, Т. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. М., Физматгиз, 1962.