

- а) для взрывов, проводимых на глубине большей, чем  $0.6 \sqrt[3]{c}$ ;  
 б) для взрыва 1000-тонного заряда.

В остальных случаях опытные данные были меньше рассчитанных по формуле. Такое расхождение объясняется замедляющим действием силы сопротивления воздуха на движения кусков грунта. Это действие для кусков грунта размером 10—20 см существенно при скоростях движения, больших  $30 \text{ м/сек}$  (что имеет место при взрывах заряда на глубине, меньшей чем  $0.6 \sqrt[3]{c}$ ). Что касается взрыва заряда весом 1000 т, то при этом взрыве размер разлетающихся кусков грунта был настолько велик (несколько метров в поперечнике), что действие силы сопротивления воздуха было несущественно и при скоростях движения, близких к  $100 \text{ м/сек}$ , которыми обладали эти куски.

Таким образом, формула (2) представляет собой верхнюю границу для максимальной дальности разлета грунта в идеальных условиях (однородный грунт, равномерное действие взрыва по всем направлениям и др.).

При определении безопасных расстояний по разлету грунта необходимо учитывать реальные условия проведения взрывов, которые могут увеличить дальность разлета по отдельным направлениям, например, неоднородность грунта или наличие ветра.

Поступило 10 X 1960

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашов А. Н., Родионов В. Н., Сухотин А. П. Взрыв в неограниченной легко уплотняющейся среде. ДАН, 1958, т. 123, № 4.

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

А. Я. Апин, И. М. Воскобойников  
 (Москва)

Одной из важных задач теории детонации является расчет параметров детонационной волны в ВВ, для которого известна лишь химическая формула. Гидродинамическая теория детонации позволяет для определения скорости детонации  $D$ , массовой скорости  $u$ , давления  $p$ , удельного объема  $v$  и температуры  $T$  продуктов взрыва составить систему из пяти уравнений: три закона сохранения (массы, количества движения и энергии), условие Чепмена — Жуке и уравнение состояния.

От того, насколько удачен выбор уравнения состояния продуктов взрыва, зависят совпадение результатов расчета с экспериментом и сложность проведения самого расчета. Сравнение экспериментальных данных [1,2] с результатом расчета по большинству используемых в настоящее время уравнений состояния продуктов взрыва [3,4,5] не позволяет ни одно из них считать удовлетворительным.

Ввиду этого было решено обойти необходимость введения уравнения состояния продуктов взрыва, используя эмпирические зависимости.

На основании экспериментальных значений давления и температуры продуктов взрыва гексогена, тэна, нитрометана и нитроглицерина была предложена [1] формула вычисления температур детонации

$$T = 4.8 \cdot 10^{-9} p v (v - 0.20) M$$

где  $T$  — температура в  $^{\circ}\text{K}$ ,  $p$  — давление в *барах*,  $v$  — удельный объем продуктов взрыва в  $\text{см}^3/\text{г}$ ,  $M$  — средний молекулярный вес продуктов взрыва. Эта зависимость была проверена на большом числе ВВ, и ошибка расчета по ней не превышала  $200^{\circ}\text{K}$ .

Большое число данных об измерении массовых скоростей продуктов взрыва показало, что ее можно рассчитывать по выражению  $u = D/(k+1)$ , где  $k$  — коэффициент, не зависящий от плотности заряжения ВВ и меняющийся от одного ВВ к другому от 2.4 до 3.0. Использование в расчетах для всех ВВ значения 2.7 не приводит к ошибке более чем 5%, в то время как ошибка опыта обычно составляет до 3%. Если  $u = D/(k+1)$ , то из уравнения сохранения массы  $v = kv_0/(k+1)$ .

Измеренные и рассчитанные по формуле (1) температуры детонации позволяют записать выражение для внутренней энергии продуктов взрыва  $E$  как функцию давления и температуры. Нами была сделана попытка представить это выражение в виде

$$E = \int c_v dT + f(p)$$

где  $c_v$  — молярная теплоемкость продуктов взрыва в идеальном газовом состоянии [3]. Для проверки этого предположения были вычислены значения  $f(p)$  на 1 моль продуктов взрыва гексогена 1 и тэна 2 при разных начальных плотностях заряда.

Несмотря на различия в составе продуктов взрыва указанных ВВ, зависимость  $f(p)$  для них описывается единым графиком (см. фигуру), который справедлив также для продуктов взрыва нитрометана 5, метилнитрата 4, дины 3 и ряда других ВВ. Приближенно эту зависимость можно описать аналитически выражением  $f(p) = 30 (\lg p - 10.8)$ , где  $p$  — давление в *барах*.

С введением указанных эмпирических зависимостей первоначальная система уравнений может быть заменена на следующую

$$T = 4.8 \cdot 10^{-3} p v (v - 0.20) M \quad (1)$$

$$v = \frac{k}{k+1} v_0 \quad (2)$$

$$\int c_v dT + f(p) = M [Q + 0.5 p (v_0 - v)] \quad (3)$$

$$D = v_0 \sqrt{p / (v_0 - v)} \quad (4)$$

$$u = \sqrt{p (v_0 - v)} \quad (5)$$

После подстановки (2) в (1) и (5) в (3) получаем два уравнения, содержащие лишь  $p$  и  $T$ , которые проще решать подбором (методом попыток). После того как  $p$  найдено,  $D$  и  $u$  находим по (4) и (5). Входящий в (2) коэффициент  $k$  для большинства ВВ можно считать равным 2.7.

В уравнение сохранения энергии (3) входит теплота взрывной реакции  $Q$ . Обычно предполагается следующая схема реакции разложения в детонационной волне: к плоскости Чемпена — Жуге водород полностью окисляется до воды, а образование  $\text{CO}_2$  возможно лишь после полного окисления углерода до  $\text{CO}$ .

Для продуктов взрыва ВВ с нулевым кислородным балансом полученная выше зависимость  $f(p)$  справедлива при отношении концентраций  $[\text{CO}_2] / [\text{CO}] \approx 2.5$ . Для ВВ с отрицательным кислородным балансом  $[\text{CO}_2] / [\text{CO}] \leq 2.5$ . Значение последнего отношения для ВВ с нулевым кислородным балансом может рассматриваться лишь как некоторое практическое правило, учитывающее, что даже при достаточном количестве кислорода углерод полностью не окисляется до  $\text{CO}_2$  в детонационной волне (см. таблицу).

#### Расчет параметров детонационной волны конденсированных ВВ

ВВ	Эксперимент				Расчет		
	$\rho_0, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$D, \frac{\text{м}}{\text{сек}}$	$p \cdot 10^3, \text{бар}$	$T^\circ \text{К}$	$D, \frac{\text{м}}{\text{сек}}$	$p \cdot 10^3, \text{бар}$	$T^\circ \text{К}$
Нитроглицерин	1.60	7650	253	4000	7700	255	4250
Нитроглицоль	1.50	7400	—	4400	7450	225	4300
Метилнитрат	1.21	6750	—	4500	6800	150	4550
Нитрометан	1.14	6300	133	3700	6300	125	3600
Гексоген	1.80	8850	390	3700	8600	360	3750
Тэн	1.77	8600	350	4200	8400	340	4150
Тротил	1.62	7000	242	—	7050	215	2350
Тетрил	1.70	7860	263	2950	7850	265	2940
Дина	1.67	8000	—	3700	8000	290	3500
	1.48	7400	—	3450	7450	215	3550

Результаты расчета параметров детонационной волны по выражениям (1)–(5) приведены в таблице, где для сравнения помещены некоторые экспериментальные значения  $D$ ,  $p$  и  $T$ . Скорости детонации определялись нами оптическими и ионизационными методами, ошибка измерения 100 м/сек. Температуры измерялись также нами цветовым методом [1], ошибка измерения  $\pm 150^\circ \text{К}$ . Давления измерены А. Н. Дреминым [2] откольным методом. Результаты расчета хорошо совпадают с экспериментальными данными, что дает нам право рекомендовать предложенную систему расчета для предсказания параметров детонационной волны конденсированных ВВ.

Поступила 8 VIII 1960

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воскобойников И. М. и Апин А. Я. Измерение температуры детонационного фронта ВВ. ДАН СССР, 1960, т. 130, № 4.
2. Дремин А. Н. и Похил П. Ф. Параметры детонационной волны тротила, гексогена, НГЦ и нитрометана. ДАН, СССР, 1959, т. 125, № 5.
3. Cook M. A. Science of high explosives. N. Y., 1958.
4. Murgai M. P. The detonation of pentaerythritol tetranitrate. J. Chem. Phys., 1953, vol. 21, № 1403.
5. Зельдович Я. Б. и Компанец А. С. Теория детонации. Гостехтеориздат, М., 1955.

