

данными ($\sim 0,33$ мкс). Это говорит о единстве механизма разложения литого тротила как в режиме инициирования детонации, так и при детонации. Соотношение длительностей химических пиков стационарной детонации тротила с различной начальной плотностью [11] примерно соответствует зависимости от давления и степени сжатия по (5), (6). Это дает надежду использовать (5), (6) для расчета кинетики разложения тротила с различной структурой при соответствующей коррекции концентрационного множителя.

Автор благодарит Г. А. Савельеву за помощь в подготовке и проведении опытов.

Поступила в редакцию
12/X 1976 -

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададулов, В. С. Трофимов, В. А. Яковлева. ФГВ, 1968, 4, 3 397.
2. M. Cowperthwaite, R. F. Williams. J. Appl. Phys., 1971, 42, 1, 456.
3. А. Н. Дремин, И. А. Карпухин. ПМТФ, 1960, 3, 184.
4. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, № 477—74. Деп. от 28 февр. 1974.
5. N. L. Coleburn, T. P. Liddiard. J. Chem. Phys., 1966, 44, 5, 1929.
6. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов.— В сб.: Взрывное дело, № 63/20, 1967.
7. А. А. Воробьев, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ПМТФ, 1974, 5, 94.
8. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., «Наука», 1974.
9. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2, 203.
10. Д. Янг. Кинетика разложения твердых веществ. М., «Мир», 1969.
11. А. П. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.

ОБОБЩЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ВВ ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА

М. Н. Борзых, Б. Н. Кондриков

(Москва)

Зависимость скорости детонации ВВ от плотности заряда — одна из основных зависимостей, необходимых для построения теории детонации, — имеет большое практическое значение. Для разных ВВ она определена во многих работах и обычно выражается [1] в виде уравнения

$$D = A + B\rho_{00}, \quad (1)$$

где D — скорость детонации; ρ_{00} — плотность заряда; A и B — эмпирические коэффициенты. Значения последних для ряда ВВ можно получить из данных, приведенных в [2] (см. также [1]).

Если ввести скорость детонации D_0 при наибольшей достижимой при обычных условиях для данного вещества плотности ρ_0 (плотность совершенного кристалла или плотность жидкости в отсутствие газовых включений), то формулу (1) можно привести к безразмерному виду, удобному для сравнения разных ВВ

$$R = 1 - \alpha m, \quad (2)$$

где $R = D/D_0$ — относительная скорость детонации; $m = (\rho_0 - \rho_{00})/\rho_0$ — пористость заряда; $\alpha = B\rho_0/D_0$. В технике, кроме пористости, для харак-

Таблица 1

Данные по зависимости скорости детонации от плотности заряда для индивидуальных ВВ

Вещество	Интервал изменения плотности, г/см ³	ρ_0 , г/см ³	D_0 , км/с	A , км/с	B , км/с · см ³ · г	α	Ссылка
Тротил	0,57—1,64	1,663	7,17	1,844	3,204	0,743	[3, 4, 6—8, 13—15]
Тэн	0,241—1,77	1,773	8,30	2,179	2,460	0,738	[3, 6, 7, 10, 12, 14, 15, 17, 25]
Гексоген	0,44—1,80	1,816	8,91	2,395	2,589	0,731	[4—9, 13, 14, 22]
Тетрил	0,244—1,71	1,73	7,93	2,329	3,237	0,706	[3, 6—8, 14]
Тринитрофенол	0,25—1,70	1,767	7,65	1,879	3,266	0,754	[3, 4, 8, 11, 13, 14, 23]
Дина	0,95—1,67	1,67	8,06	1,849	3,718	0,770	[6—8, 19, 20]
Гексил	0,7—1,64	1,653	7,46	1,547	3,575	0,793	[24]
ЦТМТНА	0,85—1,57	1,585	7,95	2,065	3,714	0,740	[24]
Тринитробензол	0,62—1,66	1,688	7,43	1,741	3,369	0,766	[14, 21, 22]
Пироксилин (13,3% N)	0,13—1,53	1,665	7,58	1,866	3,433	0,754	[5, 8]
Нитропентанон	0,53—1,57	1,621	7,47	1,553	3,647	0,794	[3]
Нитрогексанол	0,33—1,58	1,655	7,71	1,977	3,466	0,744	[3]
Пентрил	0,80—1,40	1,82	8,35	2,316	3,317	0,723	[18, 23, 24]

Примечание. ЦТМТНА — циклотриметилентринитрозоамин (аналог гексогена). Нитропентанон — $C_5H_{12}N_4O_{13}$ -тетранитрат 2, 2, 5, 5-тетраметилолциклопентанона [3]. Нитрогексанол — $C_{10}H_{15}N_5O_{19}$ -2,6-бис (нитроксиметил) циклогексанолнитрат [3]. Пентрил — $C_7H_8N_6O_{11}$ -2, 4, 6-тринитрофенилнитроксипентилнитрамин [8].

характеристики степени уплотнения ВВ применяют также безразмерную величину, называемую относительной плотностью заряда,

$$\delta = \rho_{00}/\rho_0 = 1 - m.$$

С использованием этой величины уравнение (2) принимает вид

$$R = \alpha_1 + \alpha\delta, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = 1 - \alpha$. Наконец, положив $1 - R = (D_0 - D)/D_0 = F$, получим, что эта величина пропорциональна пористости

$$F = \alpha m. \quad (4)$$

Очевидно, что определение фундаментальной константы α по имеющимся экспериментальным данным весьма полезно.

По приведенным в оригинальных работах значениям скорости детонации при различной начальной плотности заряда были построены графики в координатах $\rho_{00} - D$ для 13 индивидуальных вторичных ВВ и 6 взрывчатых смесей. Во всех случаях по экспериментальным точкам проводились прямые типа уравнения (1). Коэффициенты A и B , рассчитанные по методу наименьших квадратов, собраны в табл. 1, 2. Три из полученных таким образом графиков приведены на рис. 1. Они относятся к веществам, для которых имеется наибольшее количество экспериментальных данных, — тротилу, тэну и гексогену.

На рис. 1, *a* нанесены данные работ [3, 4, 6—8, 13—16] для тротила. Значения скорости, полученные в [3], гораздо ниже величин, полученных в более поздних работах. Очевидно, как это отмечено в [4], относительно малые диаметры зарядов не позволили автору работы [3] получить для тротила идеальной скорости детонации. При расчете коэффициентов эти данные не учитывались. В итоге получилась формула

$$D = 1,844 + 3,204 \rho_{00}, \quad (5)$$

Таблица 2

Зависимость скорости детонации от плотности заряда для смесей на основе тротила

Смесь	Мас-совый состав	Интервал изменения плотности, г/см ³	ρ_0 , г/см ³	D_0 , км/с	A , км/с	B , км/с·см ³ /г	α	Ссылка
Тротил/гексоген	50/50	0,53—1,69	1,736	7,88	2,573	3,059	0,674	[4, 7, 14]
	40/60	1,05—1,72	1,752	8,06	2,805	3,002	0,652	[2, 14, 15]
	35/65*		1,759	8,17	2,673	3,127	0,773	[25]
	25/75	1,00—1,72	1,775	8,66	2,586	3,422	0,701	[13, 14]
	22/78*		1,780	8,39	2,702	3,193	0,678	[25]
Тротил/октоген	25/75	1,20—1,80	1,876	8,64	2,506	3,268	0,710	[14]
Тротил/тэн	50/50	1,0—1,68	1,716	7,70	2,380	3,100	0,691	[14]
Тротил/тетрил	30/70	1,01—1,64	1,709	7,59	2,491	2,982	0,672	[13, 14]
	35/75*		1,706	7,66	1,86	3,40	0,757	[2]

которая близка к полученной в [4]

$$D = 1,800 + 3,250 \rho_{00}$$

В работе [2] получено $D = 1,785 + 3,225 \rho_{00}$.

Подробное изучение зависимости $D(\rho_{00})$ для тэна (см. рис. 1, б) предпринято в работе [12], где приведено около ста значений D , полученных фотографическим и осциллографическими методами в интервале

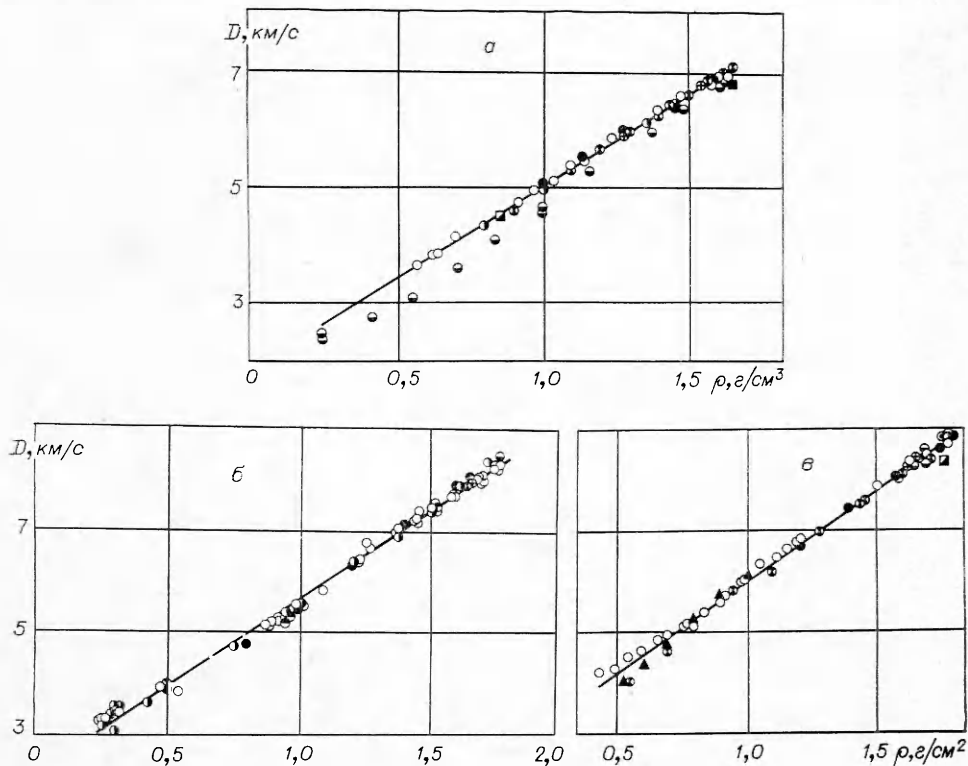


Рис. 1. Зависимость скорости детонации от плотности заряда.

изменения плотности от 0,25 до 1,773 г/см³. На разных участках этого интервала зависимости $D(\rho_{00})$ несколько отличаются друг от друга:

$$\begin{aligned} \rho_{00} < 0,8 & \quad D = 2,60 + 2,725\rho_{00}, \\ 0,8 < \rho_{00} < 1,65 & \quad D = 1,82 + 3,70\rho_{00}, \\ 1,65 < \rho_{00} & \quad D = 2,88 + 3,05\rho_{00}. \end{aligned}$$

Эти различия видны и на рис. 1, б: в средней части графика все точки лежат ниже прямой, в левой — они в большинстве своем выше прямой. Тем не менее и в этом случае линейная зависимость в первом приближении несомненно выполняется. Во всем рассмотренном диапазоне изменения плотности она имеет вид

$$D = 2,179 + 3,460\rho_{00}, \quad (6)$$

по данным [2]

$$D = 1,60 + 3,95\rho_{00}.$$

Эта прямая пересекается с проведенной на рис. 1, б при $\rho_{00} = 1,2$ г/см³ и идет более круто, т. е. при малой плотности еще сильнее отклоняется от экспериментальных значений.

В работе [10] предложена зависимость скорости детонации тэна от плотности $D = 2,8 + 2,8\rho_{00}^{1,3}$, которая дает значения скорости детонации, практически не отличающиеся от вычисленных по формуле (6) в интервале изменения плотности 0,5 ÷ 1,35 г/см³ (наибольшее отклонение составляет 50 м/с). При $\rho_{00} > 1,35$ г/см³ отклонение увеличивается и при $\rho_{00} = 1,73$ г/см³ составляет 350 м/с. Зависимость $D(\rho_{00})$, полученная в [10], идет выше основных экспериментальных точек.

В случае гексогена (см. рис. 1, в) экспериментальные значения D , полученные в работе [4] при $\rho_{00} < 0,8$ г/см³, существенно отличаются от результатов [5]. В работе [5] расхождение объясняется тем, что в [4] опыты проводились в стеклянных трубках, скорость распространения звука по стенкам которых превышала скорость детонации и могла повлиять на нее. Полученная по всем имеющимся результатам формула

$$D = 2,395 + 3,589\rho_{00} \quad (7)$$

практически совпадает с приведенной [2].

Среднее отклонение экспериментальных данных от прямых (5) — (7) составляет для тротила (данные [3] не учитывались) 0,8%, тэна — 1,6%, гексогена — 1,3%.

Значения α приведены в табл. 1. Легко видеть, что для всех рассмотренных веществ они заключены в узких пределах — от 0,71 до 0,79. Среднее значение α по данным для всех индивидуальных ВВ составляет $0,75 \pm 0,02$ ¹.

В табл. 1 для всех веществ приведены взятые из справочников и оригинальных работ значения наибольшей достижимой плотности ρ_0 , представлявшиеся нам наиболее надежными. Скорость детонации при этой плотности D_0 рассчитывалась для каждого вещества по уравнению (1) с коэффициентами, приведенными в табл. 1. Небольшая ошибка в значении ρ_0 слабо сказывается на величине константы α . Ошибка в максимальной плотности на 0,05 г/см³ приводит к ошибке в величине α в среднем на 0,006, что гораздо меньше приведенной выше средней погрешности.

Интересно, что для трех наиболее изученных ВВ — тротила, тэна и гексогена — значения α практически совпадают со средней для всех рассмотренных веществ величиной. Не исключено, что значительные от-

¹ Для нескольких ВВ по ограниченному числу данных тот же результат получил ранее Ю. П. Неласов.

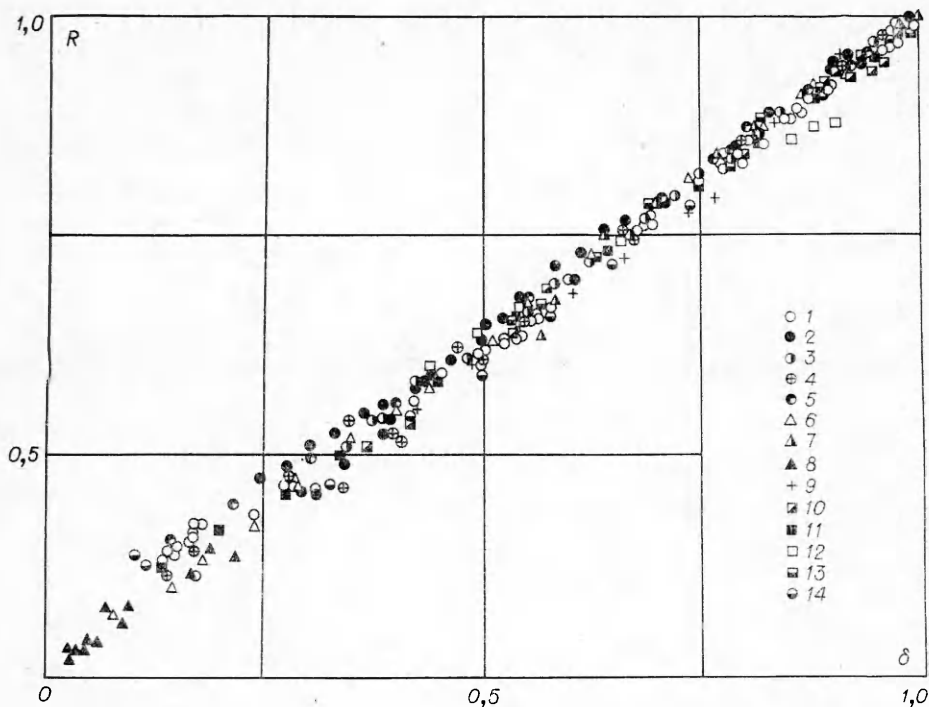


Рис. 2. Обобщенная зависимость скорости детонации от плотности заряда для индивидуальных вторичных ВВ; $R = D/D_0$, $\delta = \rho_{00}/\rho_0$.

1 — тэн; 2 — гексоген; 3 — тротил; 4 — пикриновая кислота; 5 — тетрил; 6 — пироксилин; 7 — дина; 8 — мипора — НГЦ 40/60; 9 — гексил; 10 — тринитробензол; 11 — нитрогексанол; 12 — пентрил; 13 — циклотриметилентринитрозамин; 14 — нитропентанол.

клонения от среднего значения связаны с погрешностью экспериментального определения зависимости $D(\rho_{00})$.

Вывод о том, что постоянная α для всех рассмотренных ВВ приблизительно одинакова, подтверждает и рис. 2, на котором в координатах $\delta - R$ нанесены точки для 13 индивидуальных ВВ, перечисленных в табл. 1, а также для смеси нитроглицерина (60/40) с пористой фенолформальдегидной смолой мипорой (по данным Г. Д. Козака). Все точки группируются вдоль одной прямой вида (4), коэффициенты которой, рассчитанные по методу наименьших квадратов, практически те же самые, что получаются усреднением данных табл. 1: $\alpha = 0,74$, $\alpha_1 = 0,26$; коэффициент корреляции 0,99; остаточная дисперсия 0,0011; стандартное отклонение 0,03; доверительные интервалы для $\alpha - 0,01$, для $\alpha_1 - 0,01$ с 5%-ным уровнем значимости.

Таким образом, для индивидуальных вторичных ВВ обобщенная зависимость скорости детонации от плотности имеет вид

$$F = 0,74m.$$

Как показывает пример смеси нитроглицерина с мипорой, та же формула пригодна и для описания зависимости скорости детонации от плотности некоторых взрывчатых смесей. Результаты, приведенные в литературе, показывают, однако, что в случае смесей гексогена, октогена и тэна с тротилом значения α получаются в среднем заметно ниже, т. е. прямые $D(\rho_{00})$ идут более полого, чем для индивидуальных ВВ².

² Применительно к составу тротил — гексоген (50/50) в работе [4] отмечалось, что при малой плотности скорость детонации состава близка к кривой $D(\rho_{00})$ для гексогена, а при большой — к кривой для тротила.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Для трех смесей, помеченных звездочкой, в оригинальных работах приведены не значения скорости при данной плотности, а уравнения вида (1). Для этих ВВ величины α несколько менее надежны. Наибольшую достижимую плотность смеси ρ_0 получали в предположении аддитивности удельных объемов компонентов.

Из табл. 2 следует, что для смесей тротила с гексогеном, октогеном и тэном средняя величина $\alpha=0,68$. В случае смесей с тетрилом (65—70%) такой определенности нет: по данным [13, 14] величина α примерно такая же, как для других смесей, рассмотренных в табл. 2; коэффициенты прямой, полученные из [2], дают заметно большее значение, практически совпадающее с полученным для индивидуальных ВВ.

Надежность приведенных в литературе зависимостей $D(\rho_{00})$ в случае инициирующих и быстрогорящих ВВ в среднем ниже, чем для вторичных. Предварительные оценки показывают [26], что для них α может быть гораздо больше, чем нормальное значение (3/4), полученное в данной работе для вторичных ВВ. Для более определенных заключений нужны дополнительные измерения.

Поступила в редакцию
20/X 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
2. M. A. Cook. The Science of High Explosives. London, 1958.
3. W. Friederich. Z. ges. Schiess- und Sprengstoffwesen, 1933, 28, 2, 51, 80, 113.
4. Л. Н. Стесик, Л. Н. Акимова.— В сб.: Физика взрыва, № 5. Изд-во АН СССР, 1956.
5. Л. Н. Стесик, Н. С. Шведова. ПМТФ, 1964, 4, 124.
6. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1960, 4, 54; Докл. АН СССР, 1960, 130, 4, 804; ПМТФ, 1961, 5, 117.
7. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1959, 128, 5, 989; А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
8. Г. А. Авакян. Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ. М., Изд-во ВИА им. Дзержинского, 1964.
9. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1966, 2, 85.
10. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973.
11. В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. Докл. АН СССР, 1964, 158, 2, 452.
12. H. C. Hornig, E. L. Lee, M. Finger. Fifth Symposium on Detonation. California, 1970.
13. V. T. Fedoroff. Enciclopedia of Explosives and Related Items, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, USA, PATR, 1966, 2700.
14. M. J. Kamlet, H. Hurvitz. J. Chem. Phys., 1968, 48, 8, 3685.
15. M. A. Cook. J. Phys. Chem., 1957, 61, 189; J. Am. Chem. Soc., 1957, 79, 32.
16. W. Fickett. Los Alamos Scientific Laboratory Rept., LA-2712, 1962; C. L. Mader. Los Alamos Scientific Laboratory Rept., LA-2900, 1963.
17. M. P. Murgai. J. Chem. Phys., 1953, 21, 1403.
18. G. Wright, W. Chute. Am. pat. 2461582 (1944, 1949); W. Chute a. o. Can. J. Res., 1948, 26B, 89.
19. Le Roy, V. Clark. Ind. Ing. Chem., 1933, 26, 1385.
20. M. Kirsch. Can. J. Res., 1948, 26B, 435.
21. Dotriche. Z. ges. Schiess- und Sprengstoffwesen, 1912, 7, 401; Mem. Poudres, 1911, 16, 27.
22. H. Kast. Z. ges. Schiess- und Sprengstoffwesen, 1913, 8, 89, 173; Z. f. ang. Chemie, 1923, 36, 72.
23. G. Desseigne. Mem. Poudres, 1951, 33, 255.
24. L. Medard, M. Dutour. Mem. Poudres, 1955, 37, 19, 25; L. Medard. Mem. Poudres, 1951, 33, 45.
25. R. D. Cowan, W. Fickett. J. Chem. Phys., 1956, 24, 932.
26. М. Н. Борзых, Б. Н. Кондриков, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1976, 3, 451.