

6. Edwards D. H., Thomas G. O., Nettleton M. A. J. Fluid Mech., 1979, 95, 1, 79.
7. Lee J. H., Matsui H. Comb. Flame, 1977, 28, 1, 61.
8. Matsui H., Lee J. H. // 17th Symp. (Intern.) on Comb.—Pittsburgh, Pa: Comb. Inst., 1978.
9. Klustautas R., Lee J. H., Guirao C. M. Comb. Flame, 1982, 48, 1, 63.
10. Шуленин Ю. Б., Бохон А. Ю. Докл. АН СССР, 1981, 257, 3, 680.
11. Васильев А. А. ФГВ, 1985, 12, 2, 142.
12. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах.—М.: Наука, 1970.
13. Трошин К. Я. Докл. АН СССР, 1978, 240, 3, 644.
14. Hayashi A. K., Fujiwara T. // 11th Intern. Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems.—Warsawa, 1987.
15. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн.—М.: Наука, 1977.

*Поступила в редакцию 18/1 1988,  
после доработки — 17/VII 1988*

УДК 534.222.2

## ОБ ИЗЛОМЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ОТ НАЧАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ТНТ

*А. Н. Дремин, С. В. Першин, С. В. Пятернев, Д. Н. Цаплин  
(Черноголовка)*

Зависимость скорости детонации  $D$  от начальной плотности  $\rho$  — одна из важнейших характеристик взрывчатого вещества (ВВ); она несет наиболее достоверную информацию о процессе детонационного превращения, поскольку  $D$  — единственный надежно измеряемый параметр этого процесса. Столь же надежно может быть измерена начальная плотность ВВ. Неслучайно поэтому экспериментальная зависимость  $D(\rho)$  используется в качестве критерия истинности в численном моделировании детонации. Любая особенность на этой связи указывает на то или иное событие, происходящее в зоне химической реакции.

Если инженерные расчеты не требуют высокой точности регистрации  $D(\rho)$ , то в развитии теории детонации, в правильной интерпретации результатов, полученных, например, на смесях данного ВВ с добавками, способными к превращениям в зоне химической реакции, точное знание этой зависимости может иметь решающее значение.

Справедливость этого мнения иллюстрируется в настоящей работе примером неправильной (из-за неточного знания величины  $D(\rho)$  для тринитротолуола (ТНТ)) интерпретации данных по измерению скорости детонации в смеси ТНТ с графитоподобным нитридом бора, когда обнаруженный на кривой для этой смеси излом был объяснен поведением добавки, а не собственно ВВ [1].

Линейный ход  $D(\rho)$  без теоретического обоснования часто используется для аппроксимации экспериментальных данных. Проанализировав большой экспериментальный материал по измерению скорости детонации в 13 индивидуальных ВВ и в 6 их смесях, авторы работы [2] установили для каждого из ВВ аналитическую линейную связь  $D$  и  $\rho$  и затем построили для этой группы ВВ обобщенную зависимость  $D(\rho)$ . В числе этих ВВ оказался и ТНТ. Поэтому излом на кривой  $D(\rho)$  для его смеси с нитридом бора в [1] объяснен полиморфным превращением нитрида бора в плотную модификацию, а не изменением режима детонации самого ТНТ.

Позже авторы [1] ознакомились с работой [3], где зависимость  $D(\rho)$  для ТНТ при  $\rho = 1,55 \text{ г/см}^3$  претерпевает излом в сторону меньших скоростей. Это заставило усомниться в правильности вывода [1] об обусловленности излома полиморфным превращением добавки. Из сравнения

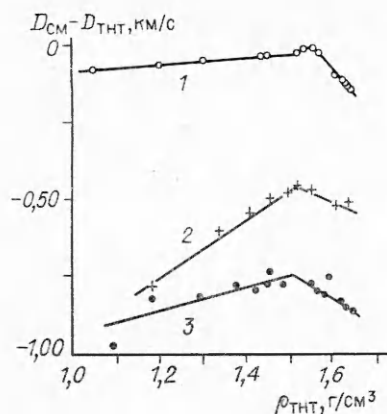


Рис. 1. Зависимости скорости детонации от начальной плотности. 1 — ТНТ; 2 — смеси ТНТ с графитом; 3 — смеси ТНТ с графитоподобным нитридом бора.

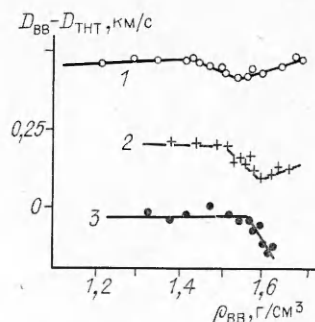


Рис. 2. Зависимости скорости детонации от начальной плотности: 1 — ТГ 50/50; 2 — ТГ 75/25; 3 — ТНТ.

кривых на рис. 1 очевидна аналогия в поведении ТНТ и его смеси с нитридом бора. По оси ординат здесь отложена разность скоростей детонации индивидуального ТНТ и его смесей с невзрывчатыми добавками. В качестве исходной для отсчета линии (линии нулевой разности скоростей детонации) использован начальный участок зависимости  $D(\rho)$ , полученной в [3] для зарядов ТНТ бесконечно большого диаметра. На рис. 1, 2 представлены данные для смеси ТНТ с коллоидным графитом (массовое содержание, как и в случае с нитридом бора, 75/25). Видно, что и в этом случае при высокой плотности зарядов измеренные значения  $D$  расположены ниже первоначального хода зависимости. Данные, позволившие выявить этот излом (см. рис. 1, 2), получены после публикации [1] и свидетельствовали не в ее пользу — близость параметров детонации в изломах кривых 2 и 3 отрицала их обусловленность полиморфными превращениями вещества добавки, поскольку давления начала превращений нитрида бора и графита в ударных волнах различаются почти в 2 раза.

Следует отметить, что если в работе [2] результаты [3] просто не учтены, то в [4] они подвергнуты критике, а наличие обнаруженного в [3] излома отрицается. В подтверждение линейного во всем диапазоне начальных плотностей хода зависимости  $D(\rho)$  в [4] приводятся данные [5] по измерению скорости детонации в литом ударно-сжатом ТНТ, которые, по мнению авторов [4], согласуются с линейным ходом полученной ранее [2] связи  $D(\rho)$ . Надо сказать, что результаты [5] в отличие от данных [3] имеют большой разброс, а построенная по ним прямая существенно круче, чем линейная зависимость [2]. Отметим, что при  $\rho > 1,55$  г/см<sup>3</sup> данные известных работ по  $D_{TNT}$  располагаются ниже прямой, экстраполированной из области низких начальных плотностей.

Ввиду отрицательного отношения некоторых специалистов к результатам работы [3] для выяснения вопроса о наличии излома на линии  $D(\rho)$  для ТНТ было решено снять эту зависимость заново.

Скорость детонации регистрировалась на базе 80 мм в конце заряда диаметром 40 и длиной (вместе с детонационной линзой) 170 мм ионизационными датчиками с использованием одновременно трех частотомеров ЧЗ-34. Точность регистрации не хуже 0,5%. Полученные данные представлены в таблице и, как видно из рис. 2, находятся в согласии с результатами [3], т. е. подтверждают наличие излома на линии  $D(\rho)$ . Согласно [6], появление излома можно объяснить либо изменением механизма конденсации углерода («Точный механизм, который мог бы служить этому причиной, неясен» [6], стр. 114), либо (и этой причине автор [6] отдает предпочтение) изменением состава продуктов детонации, которое при  $\rho_{TNT} > 1,55$  г/см<sup>3</sup> сопровождается увеличением количества газообразного углерода. При рассмотрении первой причины в работе [6]

Экспериментальные данные по зависимости скорости детонации (км/с) от начальной плотности (г/см<sup>3</sup>) для ТНТ и его смесей с гексогеном

$\rho$	$D$	$D_0 - D$	$\rho$	$D$	$D - D_0$	$\rho$	$D$	$D - D_0$
ТНТ			ТГ 75/25			ТГ 50/50		
1,329	6,076	0,032	1,378	6,467	0,202	1,206	6,167	0,451
1,377	6,212	0,049	1,430	6,626	0,196	1,293	6,471	0,477
1,418	6,363	0,029	1,490	6,810	0,188	1,349	6,633	0,461
1,476	6,573	0,004	1,506	6,859	0,186	1,416	6,844	0,458
1,517	6,671	0,037	1,527	6,885	0,145	1,428	6,891	0,467
1,543	6,736	0,055	1,536	6,919	0,151	1,443	6,926	0,454
1,566	6,814	0,050	1,550	6,957	0,144	1,472	7,002	0,438
1,581	6,826	0,086	1,560	6,998	0,153	1,500	7,096	0,443
1,589	6,872	0,065	1,570	6,979	0,102	1,503	7,096	0,433
1,601	6,850	0,125	1,594	7,038	0,085	1,526	7,142	0,406
1,605	6,842	0,146	1,617	7,126	0,100	1,553	7,240	0,418
1,615	6,883	0,137	1,634	7,197	0,116	1,565	7,293	0,432
			1,651	7,244	0,109	1,592	7,367	0,420
						1,633	7,521	0,444
						1,669	7,672	0,480
						1,682	7,698	0,464

для совпадения расчетной зависимости с экспериментальной [3] величина изменения теплоты образования углерода принята равной 6 ккал/моль.

Наличие излома на зависимости  $D(\rho)$  для ТНТ заставило предположить, что он обусловлен появлением в продуктах детонации алмаза. В пользу такого предположения свидетельствуют следующие обстоятельства: 1)  $p$ ,  $T$ -условия, в которых находится углерод продуктов детонации в зоне химической реакции высокоплотного ТНТ, соответствуют области стабильности алмаза на диаграмме состояния углерода; 2) время пребывания углерода в химике сравнимо со временем перехода графита в алмаз в УВ и, по-видимому, достаточно для организации углерода в алмазную форму, термодинамически выгодную в данных условиях.

Еще одно обстоятельство, свидетельствующее в пользу сделанного предположения, состоит в близости рассчитанного при  $p = 20$  ГПа значения разности энтальпий (5,9 ккал/моль) на ударных адиабатах графита и алмаза к значению (6,0 ккал/моль) убыли теплового эффекта реакции, найденному в [6] для согласования расчета с экспериментом.

Излом, соответствующий появлению алмаза в зоне химической реакции на зависимости  $D(\rho)$ , полученной в работе [7] в результате термодинамических расчетов детонации тротила, имеет место при  $\rho = 1,25$  г/см<sup>3</sup>, т. е. при значительно меньшей начальной плотности, а следовательно, и меньшем давлении, чем излом экспериментальной зависимости.

Значение  $\rho = 1,25$  г/см<sup>3</sup> найдено из условия пересечения кривой  $p$ ,  $T$ -состояний в плоскости Чепмена — Жуге с линией равновесия графит — алмаз на диаграмме состояния углерода. Следует вспомнить, что превращению графита в алмаз в УВ отвечают условия пересечения ударной адиабаты графита не с линией перехода графит — алмаз, а с кривой гистерезиса данного превращения, т. е. условия, сильно отличающиеся от равновесных [8]. Образование алмаза в ДВ в тротиле также происходит в неравновесных условиях [9]. Им соответствует точка пересечения линии  $p$ ,  $T$ -состояний в плоскости Чепмена — Жуге с пока еще не зарегистрированной кривой гистерезиса данного процесса. Возможно, этим и объясняется разница в значениях начальных плотностей в изломах расчетной и экспериментальной кривой  $D(\rho)$ .

Принятая нами рабочая гипотеза состояла в том, что при невысоких (до излома линии  $D(\rho)$ ) начальных плотностях углерод в зоне химической реакции ТНТ находится в форме графита, а при более высо-

ких (от излома и выше) — частично в форме алмаза; при этом доля алмаза в углеродной фракции продуктов детонации увеличивается с ростом давления в ДВ. Полному превращению углерода в алмазную форму должен отвечать второй излом, достичь которого не удастся даже при максимальной плотности прессования ТНТ. Возможно, что прямая, построенная по данным [5] в диапазоне  $\rho = 1,82 \div 1,95 \text{ г/см}^3$ , имеющая более крутой по сравнению с первоначальным ход, и является намеком на существование третьего (после второго излома) участка  $D(\rho)$ . Отождествлять эту прямую с третьим участком, по-видимому, не следует, поскольку она получена на литом, а не на прессованном ТНТ, высокая начальная плотность которого создавалась ударной волной. Скорость последней возрастала, а идущая следом за ней ДВ на идеальный режим не выходила.

Регистрацию третьего участка можно было бы осуществить, повысив начальную плотность ТНТ в установке высокого статического давления. Поскольку такой установки не было, было сделано иначе — к ТНТ добавили более мощный гексоген с тем, чтобы при той же начальной плотности ТНТ в заряде повысить давление детонации и сместить предполагаемую картину (зависимость с двумя изломами) в сторону меньших начальных плотностей. К тому же и максимальная плотность заряда ТГ выше, чем заряда ТНТ. Надо сказать, что эта попытка предпринята, как и в случае с ТНТ, несмотря на то, что зависимости для ТГ считались линейными [2].

В опытах, аналогичных описанным выше, получены зависимости  $D(\rho)$  для смесей ТГ 75/25 и ТГ 50/50 (см. таблицу). Ожидание оправдалось — каждая из зависимостей состоит из трех участков (см. рис. 2); при этом, как и предполагалось, средний участок располагается тем левее, чем больше гексогена в смеси. Примечательно, что давления Чепмена — Жуге, рассчитанные по политропическому уравнению состояния в предположении  $n = 3$ , в первых изломах всех трех зависимостей находятся в пределах 17—18 ГПа, а во вторых совпадают со значением 19,8 ГПа. Давления в первых изломах близки к началу превращения в алмаз на ударной адиабате графита, что вместе с ранее высказанными соображениями дает основание предполагать обусловленность изломов на зарегистрированных зависимостях  $D(\rho)$  для ТНТ и ТГ сменой механизма образования углерода, когда при достижении определенных условий в зоне химической реакции кристаллизация углерода в графитную форму сменяется кристаллизацией в алмаз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пятернев С. В., Першин С. В., Дремин А. П. и др. ФГВ, 1986, 22, 3, 99.
2. Борзых М. П., Кондриков Б. П. ФГВ, 1978, 14, 1, 117.
3. Urizar M. J., James E. J., Smith L. C. Phys. Fluids, 1961, 4, 2, 262.
4. Кондриков Б. П., Сумин А. П. ФГВ, 1987, 23, 1, 114.
5. Таржанов В. П. ФГВ, 1976, 12, 6, 924.
6. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. — М.: Мир, 1985.
7. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепекин В. П. Термодинамические расчеты детонации конденсированных веществ/АН СССР. ОИХФ. — Препр. — Черноголовка, 1986.
8. Пятернев С. В., Першин С. В., Дремин А. П. ФГВ, 1986, 22, 6, 125.
9. Van Thiel M., Ree F. H. Prepr. UCRL-95839. — Livermore: Lawrence Livermore National Lab., 1986.

Поступила в редакцию 16/II 1988,  
после доработки — 26/IV 1988