

6. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. — 400 с.
7. Николаев Ю.А., Фомин П.А. О расчете равновесных течений химически реагирующих газов // ФГВ. — 1982. — 18, № 1. — С. 66—72.
8. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей. — М.: Оборонгиз, 1962. — 476 с.

630090, г. Новосибирск,  
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 14/XII 1993

УДК 534.222.2

Л.Н. Акимова, Л.Н. Стесик

## ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ БИСТРИНITРОЭТИЛНИТРАМИНА С УГЛЕРОДОМ

Определена зависимость скорости детонации от плотности заряда бистринитроэтилнитрамина и его стехиометрических смесей с углеродом (сажа, графит с различным размером частиц). Характерная черта зависимостей для смесей VTNENA с углеродом — излом, положение которого соответствует следующим значениям плотностей заряда, г/см<sup>3</sup>: 1,43 для смесей с сажой, 1,15 и < 0,4 г/см<sup>3</sup> — смесь с графитом (размер частиц 10<sup>-3</sup> см), 5,6·10<sup>-3</sup> см соответственно). Дается трактовка экспериментальным результатам.

Проблема химического превращения вещества в детонационной волне продолжает привлекать внимание исследователей. Один из ее аспектов — гетерогенная реакция при детонации смесевых ВВ, в которых один компонент, разлагаясь, поставляет газообразный окислитель, а другой — твердое горючее (например, аммонал). Именно об окислении алюминия при детонации алюминийсодержащих ВВ нет единого мнения до настоящего времени. В работе [1] приведены результаты исследования скорости детонации смесей бистринитроэтилнитрамина (обозначенного в [2] VTNENA) с 10 % алюминия. Бистринитроэтилнитрамин имеет формулу C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>14</sub>N<sub>8</sub>, ΔH<sub>f,298</sub><sup>0</sup> = -28,0 кДж/моль, положительный кислородный баланс [3]. Стехиометрическое содержание алюминия в смеси 15,6 %.

На основании экспериментальных данных в [1] сделан вывод, что доля сгорающего в зоне реакции детонационной волны алюминия возрастает от 3 до 15 % при увеличении плотности заряда ρ от 1,53 до 1,85 г/см<sup>3</sup>. Следовательно, алюминий в основной части не успевает прореагировать в зоне реакции из-за относительно медленной гетерогенной реакции окисления частиц Al.

В связи с изложенным представляет интерес исследование других смесей на основе VTNENA, при детонации которых реакция частично проходит по гетерогенному механизму. Положительный кислородный баланс VTNENA дает возможность исследовать поведение углерода в смеси с ним на основе измерения скоростей детонации.

В настоящей работе измерены скорости детонации D смесей VTNENA с углеродом различной дисперсности в зависимости от ρ. Все составы рассчитаны на нулевой кислородный баланс, что соответствует содержанию углерода 5,8 %. Характеристики углерода в виде графита и технического углерода (сажи) даны в табл. 1.

Размер частиц d сажи определяли электронным микроскопом, графит I — под оптическим микроскопом, графит II представляет собой фракцию между ситами с размерами ячеек 50 и 63 мкм. Поскольку частицы графита имеют вид чешуек, указанные в табл. 1 величины соответствуют их наибольшему размеру. Наименьшие размеры частиц, которые и определяют время их горения, измерить не удалось.

Основная серия опытов проведена с зарядами диаметром 15 мм. Образцы с насыпной плотностью имели стеклянные оболочки. Заряды их прессованных таблеток помещались в плотно прилегающие целлофановые обо-

© Л.Н. Акимова, Л.Н. Стесик, 1994

Т а б л и ц а 1

Вид углерода	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$d$ , мкм	Массовый состав, %	
			углерод	водород
Сажа	1,86	0,01	97,93	0,39
Графит I	2,23	10	97,05	0,09
Графит II	2,23	56	—	—

лочки. Для определения скорости детонации использовали скоростной фоторегистратор. Среднеквадратическая ошибка измерений составляла 0,5 %, результаты опытов представлены в табл. 2 и на рисунке.

Исследованная зависимость  $D(\rho)$  смеси BTNENA + сажа, показала наличие излома на прямой при  $\rho = 1,43$  г/см<sup>3</sup>. До этой плотности скорость детонации смеси описывается линией, параллельной прямой для чистого BTNENA и лежащей выше на 260 м/с.

При  $\rho > 1,43$  г/см<sup>3</sup> наклон прямой для смеси BTNENA + сажа меньше и она пересекает линию чистого BTNENA. Положение точки излома зависит от дисперсности углерода. Для смеси с графитом I излом соответствует  $\rho = 1,15$  г/см<sup>3</sup>. В опытах с составом BTNENA + графит II положение точки излома определить не удалось, но по характеру полученной зависимости можно судить, что она находится при еще более низкой плотности ( $\rho < 0,4$  г/см<sup>3</sup>).

Можно предположить, что замедленный рост скорости детонации после излома зависит от малой величины диаметра заряда. Результаты измерений скорости детонации смеси BTNENA + сажа в зарядах диаметром 10 мм при плотностях выше точки излома совпали с результатами для зарядов с диаметром 15 мм.

Экстраполяция полученных зависимостей в сторону больших  $\rho$  показывает, что они сходятся в одну точку при  $\rho \approx 1,95$  г/см<sup>3</sup>, где скорость детонации смесей не зависит от дисперсности углерода и ниже величины  $D$  чистого BTNENA примерно на 400 м/с.

При  $\rho = 1,95$  г/см<sup>3</sup> скорость детонации BTNENA равна 8900 м/с, для BTNENA + 5,8 % углерода (графит)  $D = 9160$  м/с [4], а при  $\rho = 0,01$  г/см<sup>3</sup> соответственно для этих составов  $D = 2096$  и 2182 м/с [5].

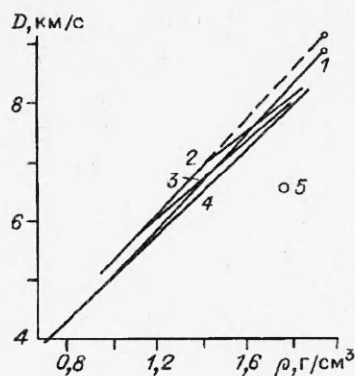
Весь комплекс знаний о детонации мощных ВВ, к которым относится BTNENA, дает основания считать, что время химического превращения при детонации таких ВВ уменьшается с увеличением  $\rho$ . В связи с этим характер

Т а б л и ц а 2

BTNENA		BTNENA + сажа		BTNENA + графит I		BTNENA + графит II	
$\rho$	$D$	$\rho$	$D$	$\rho$	$D$	$\rho$	$D$
1,01	5080	0,98	5210	1,03	5430	0,70	4000
1,47	6930	1,08	5600	1,10	5620	0,90	4670
1,59	7430	1,29	6490	1,23	6130	1,04	5020
1,71	7860	1,33	6640	1,54	7200	1,16	5430
1,78	8280	1,38	6820	1,58	7260	1,21	5700
1,87	8600	1,41	6950	1,64	7480	1,32	6130
1,91	8680	1,43	7040	1,75	7870	1,41	6450
		1,48	7160	1,78	7920	1,50	6860
		1,51	7270	1,83	8100	1,69	7660
		1,53	7310			1,89	8250
		1,62	7580				
		1,72	7810				
		1,80	8110				
		1,82	8130				
		1,84	8200				
		1,87	8240				

П р и м е ч а н и е. Размерность  $\rho$  в г/см<sup>3</sup>,  $D$  в м/с.

Зависимость скорости детонации от плотности заряда.  
 1 — BTNENA; 2 — BTNENA + сажа; 3 — BTNENA + графит I; 4 —  
 BTNENA + графит II; 5 — расчетные значения.



полученных зависимостей  $D(\rho)$  означает, что основное тепловыделение 4900 кДж/кг в детонационной волне определяется превращением BTNENA. Полное окисление углерода дает еще  $\sim 780$  кДж/кг. При этом можно полагать, что реакция гетерогенного окисления углерода идет с меньшей скоростью, чем разложение BTNENA, и гораздо слабее зависит от давления в реакционной зоне ДВ. Поскольку тепловой вклад окисления углерода относительно невелик, можно предположить, что поверхность Чепмена—Жуге в детонационной волне практически совпадает с поверхностью, где завершается разложение BTNENA. Углерод, который успевает окислиться до момента прохождения поверхности Чепмена—Жуге, увеличивает скорость детонации, остальной сгорает за зоной основного тепловыделения, и на величину  $D$  влияет как инертная добавка.

По мере увеличения  $\rho$  время превращения BTNENA уменьшается, все меньшая доля углерода, которая зависит также от размера его частиц, окисляется в зоне реакции. Чем больше размер частиц углерода, тем больше требуется времени для их окисления, тем ниже плотность заряда, при которой происходит излом зависимости  $D(\rho)$ . Последнее как раз свидетельствует о том, что частицы углерода в ДВ окисляются в форме горения с поверхности, т.е. гетерогенной реакции.

При  $\rho = 1,95$  г/см<sup>3</sup> все исследованные смеси детонируют с одинаковой скоростью, меньшей на  $\sim 400$  м/с скорости детонации чистого BTNENA. В этом случае время превращения BTNENA настолько мало, что углерод не успевает значительно окислиться независимо от размера частиц, и ведет себя как инертная добавка.

Таким образом, результаты настоящей работы в некотором отношении расходятся с выводами [1]. В данном случае с ростом плотности заряда уменьшается доля негазифицирующейся горючей добавки, прореагировавшая в зоне реакции ДВ. Одна из возможных причин расхождения — значительно меньшая разница плотностей ВВ и добавки. Кроме того, следует иметь в виду различие в скоростях детонации BTNENA. Из данных рис. 1 работы [1] видно, что плотности заряда BTNENA 1,96 г/см<sup>3</sup> соответствует  $D = 8440$  м/с. Линейная экстраполяция полученной в настоящей работе зависимости  $\rho = 1,96$  г/см<sup>3</sup> дает  $D = 8900$  м/с. В [6] экспериментально получено  $D = 8850$  м/с при  $\rho = 1,96$  г/см<sup>3</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Ю.В., Гришин А.М., Феодоритов И.И. Экспериментально-теоретическое исследование процесса окисления алюминия в детонационной волне // ФГВ. — 1992. — 28, № 5. — 124 с.
2. Гафуров Р.Г., Согомонян Е.М., Еременко Л.Т. // Изв. АН СССР. Сер. хим. — 1973. — № 12. — 2826 с.
3. Кустова Л.В., Кирпичев Е.П., Рубцов Ю.И. и др. // Изв. АН СССР. Сер. хим. — 1981. — № 11. — 2232 с.
4. Пепекин В.И., Лебедев Ю.А. // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 234, № 6. — 1391 с.
5. Стесик Л.Н. Расчет параметров детонации ВВ, содержащих металлы, с использованием уравнения состояния идеального газа // ФГВ. — 1971. — № 1. — 111 с.
6. Rothstein L.R., Petersen R. Propellants and Explosives, 1979. — Vol. 4. — P. 56—80.

142432, п. Черноголовка,  
ИХФ РАН

Поступила в редакцию 2/VI 1993