

МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

М. Ф. Гоголя, М. Н. Махов, А. Ю. Долгобородов, М. А. Бражников,
В. И. Архипов, В. Г. Щетинин

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, gogul@polymer.chph.ras.ru

Экспериментально исследовано влияние размеров частиц компонентов и структуры образцов алюминизированных смесей на чувствительность и параметры детонации октогена, нитрогуанидина, бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамина и их смесей с порошкообразным Al со средним размером частиц $0,1 \div 150$ мкм. Добавление ультрадисперсного Al к октогену и бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамину существенно повышает чувствительность к механическим воздействиям и уменьшает скорость детонации. В составах с нитрогуанидином скорость детонации практически не меняется. Регистрация профилей давления продуктов детонации позволила определить ширину зоны химической реакции и параметры Чепмена — Жуге для нитрогуанидина. Профили давления для бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамина показывают, что детонационное разложение может реализовываться в две стадии. Обнаружена двухпиковая структура детонационной волны в смесях октогена с Al. Результаты измерения температуры свидетельствуют о взаимодействии Al с продуктами детонации в непосредственной близости к фронту. Наиболее высокая температура зафиксирована для составов, содержащих ультрадисперсный алюминий и алюминиевую пудру.

Ключевые слова: октоген, нитрогуанидин, бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин, ультрадисперсный алюминий, скорость детонации, давление, температура, чувствительность.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени накоплено большое количество экспериментальных данных по параметрам детонации вторичных взрывчатых веществ (ВВ), содержащих порошки Al со средним размером частиц от нескольких микрометров и выше. Основные эмпирические закономерности влияния размера частиц и содержания Al на характеристики большинства алюминизированных составов можно кратко сформулировать следующим образом (см., например, [1–5]). Как правило, с уменьшением размера частиц и увеличением содержания Al скорость детонации, давление и массовая скорость снижаются. При увеличении содержания Al теплота взрыва и фугасное действие повышаются. Небольшое увеличение метательной способности при введении Al проявляется при относительно высоких степенях расширения продуктов детонации и зависит от размеров частиц компонентов, а также кислородного баланса ВВ.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к свойствам ультрадисперсного Al и возможностям его использования в составе ВВ (см., например, [6–9]). Ультрадисперсные частицы обладают рядом специфических свойств, в том числе разветвленной поверхностью и повышенной химической активностью. Исследование составов, содержащих ультрадисперсный Al, позволит расширить представления о макрокинетике реагирования продуктов детонации смесевых ВВ.

При сравнительном исследовании детонационных характеристик составов, содержащих ультрадисперсный Al и обычные порошки Al, необходимо учитывать реальную структуру зарядов. В настоящей работе предпринята попытка проанализировать влияние структуры зарядов на параметры детонации. Было изучено влияние свойств взрывчатой основы на детонационные характеристики алюминизированных составов.

1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве взрывчатой основы смесей использовались октоген, нитрогуанидин и бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 00-03-32231а).

Октоген (ОК, $C_4H_8O_8N_8$) — мощное ВВ с плотностью монокристалла $1,906 \text{ г/см}^3$ [10], кислородный баланс: $-21,6 \%$. В работе использовались две фракции частиц: $200 \div 300 \text{ мкм}$ (обозначаем ОК(кр)) и $10 \div 20 \text{ мкм}$ (ОК(м)).

Нитрогуанидин (НГ, $CH_4O_2N_4$) — ВВ с высоким содержанием водорода, кислородный баланс: $-30,8 \%$. При детонационном разложении НГ образуется значительное количество газообразных продуктов. Исходные кристаллы НГ имеют игольчатую форму. Размер частиц зависит от способа кристаллизации (при этом насыпная плотность изменяется в диапазоне $0,2 \div 0,8 \text{ г/см}^3$); плотность монокристалла $1,78 \div 1,80 \text{ г/см}^3$ [11]. В настоящей работе использовался технический НГ с насыпной плотностью $0,4 \text{ г/см}^3$ (ТУ РУ 731-52). Средний диаметр исходных кристаллов НГ $25 \div 50 \text{ мкм}$, длина до 500 мкм .

Бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН, $C_4H_4O_{14}N_8$) — мощный органический окислитель, плотность монокристалла $1,96 \text{ г/см}^3$ [12], кислородный баланс: $+16,5 \%$. Исходные кристаллы БТНЭН имеют игольчатую структуру со средним диаметром «иголок» $15 \div 40 \text{ мкм}$ и длиной до 500 мкм .

Характеристики порошков Al приведены в табл. 1. Далее в тексте для порошков Al использованы следующие обозначения: Al(150), Al(15), Al(7), Al(0,5) и Al(0,1), где в скобках указан средний размер частиц в микрометрах. Алюминиевая пудра обозначается как Al(п). Исследовались составы с массовым содержанием алюминия 15% . Для сравнения некоторые эксперименты проводились с порошком LiF, средний размер частиц которого около 20 мкм . LiF может рассматриваться как инертный аналог Al, так как динамическая сжимаемость LiF близка к сжимаемости Al.

Приготовление (смешение и измельчение фарфоровыми шарами) составов, содержащих сферические частицы Al с ОК и БТНЭН, проводилось в инертной жидкости (гексан) в стальном контейнере на рольгангах в течение 8 ч. Далее смеси высушивались. Размер частиц Al не изменялся. Средний размер частиц ОК(м) в готовой смеси $10 \div 20 \text{ мкм}$. Характерные размеры основной массы частиц БТНЭН в смеси $10 \div 15 \text{ мкм}$.

Размол исходного НГ не приводил к заметному изменению размера частиц. Уменьшение размера достигалось путем перекристаллизации НГ из водного раствора. После пере-

кристаллизации «иголки» НГ имели толщину $5 \div 10 \text{ мкм}$ и длину $\approx 50 \text{ мкм}$. Такие размеры частиц соответствовали порошку НГ, использованному в работе [17]. Насыпная плотность полученной фракции НГ $\approx 0,2 \text{ г/см}^3$. Для приготовления композиций с Al использовался описанный выше способ смешения на рольгангах.

Составы, содержащие ОК(кр), Al(п) готовились вручную с целью сохранения размеров частиц.

Оптико-микроскопические исследования показали, что частицы Al(п) и Al(0,1) покрывают кристаллы ОК(м) плотным слоем. В отличие от Al(15) частицы Al(7) образуют конгломераты с частицами ОК. Частицы БТНЭН в смесях практически не имеют алюминиевого покрытия. Готовая смесь НГ/Al(0,1) состоит из «иголок» НГ, достаточно равномерно покрытых слоем Al.

Заряды прессовались методом холодного одностороннего сжатия. Режимы подбирались таким образом, чтобы относительная плотность зарядов составляла $0,90 \div 0,95$ от максимально возможной. Прессование зарядов на основе ОК проводилось с добавлением небольшого количества ацетона, зарядов на основе БТНЭН — с добавлением хлороформа, а на основе НГ — этилового спирта.

В зарядах, содержащих ОК(м), частицы Al(15) и Al(7) распределяются по границам зерен ВВ, а также в промежутках между ними в виде смеси с обломками зерен ВВ. Характерные размеры зон, обогащенных Al, составляют в среднем несколько десятков микрометров, причем в промежутках между зернами содержатся конгломераты, состоящие из частиц Al и ОК или только из частиц Al. Распределение Al(0,1) в смесях более однородное, чем Al(15) и Al(7). Однако и в этом случае равномерного распределения порошка металла в заряде не наблюдается и размер неоднородностей определяется размерами зерен ОК. Al(0,1) в заряде образует фольгоподобные прослойки.

Прессованный образец БТНЭН/Al(0,1) состоит из областей, обогащенных и обедненных Al. Их размер $10 \div 40 \text{ мкм}$, при этом концентрация Al отклоняется от 15% на $\approx 5 \%$. Однако по сравнению с аналогичными зарядами на основе ОК заряды с БТНЭН по структуре более однородны, так как не содержат областей, полностью лишенных Al или ВВ. При этом масштаб неоднородностей сравним с размерами зерен ВВ.

Таблица 2
Критическое давление
иницирования взрыва

№ п/п	ВВ	p_{cr} , ГПа
1	Азид свинца	$0,38 \pm 0,03$
2	БТНЭН/Al(0,1)	$0,55 \pm 0,02$
3	БТНЭН/Al(7)	$0,60 \pm 0,02$
4	ОК/Al(0,1)	$0,67 \pm 0,03$
5	БТНЭН	$0,79 \pm 0,03$
6	ТЭн	$0,93 \pm 0,03$
7	ОК/Al(7)	$0,95 \pm 0,03$
8	ОК	$1,00 \pm 0,03$
9	Гексоген	$1,15 \pm 0,03$
10	ТНТ	$1,35 \pm 0,03$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Механическая чувствительность смесей на основе ОК и БТНЭН

Составы на основе НГ обладают относительно низкой чувствительностью к механическим воздействиям. Поэтому исследование чувствительности проводилось для ОК, БТНЭН и их смесей с Al. При этом критические давления инициирования взрыва (p_{cr}) определялись методом разрушающейся оболочки [18]. Полученные результаты представлены в табл. 2. Для сравнения в таблице приведены значения p_{cr} для некоторых известных инициирующих и вторичных ВВ [18–20].

Добавление Al(7) практически не меняет механическую чувствительность ОК. Введение же Al(0,1) снижает критическое давление ОК на 33 %. Чувствительность состава ОК/Al(0,1) выше, чем у тэна — одного из наиболее чувствительных вторичных ВВ. Такое увеличение чувствительности, вероятно, связано с высокой удельной поверхностью Al(0,1), способствующей ускорению взаимодействия Al с продуктами разложения ВВ в процессе образования «горячих точек».

Чувствительность БТНЭН выше чувствительности типичных вторичных ВВ, включая тэн (см. табл. 2). Смесей БТНЭН с Al, особенно с Al(0,1), оказываются еще более чувствительными. По чувствительности смеси БТНЭН/Al занимают промежуточное положение между

вторичными и инициирующими ВВ. Это можно объяснить двумя причинами: во-первых, сенсибилизацией ВВ твердой добавкой с температурой плавления выше, чем критическая температура воспламенения «горячей точки» [21]; во-вторых, интенсивным взаимодействием Al в «горячей точке» со свободным кислородом, продуктом разложения БТНЭН.

2.2. Измерение скорости детонации

Для определения скорости детонации использовали ионизационные датчики. Интервалы времени измеряли частотомерами или аналого-цифровыми преобразователями. Точность измерения не хуже 50 м/с.

Диаметр зарядов на основе ОК и БТНЭН 20 мм, их длина ≈ 100 мм. Иницирование осуществлялось с помощью таблетки флегматизированного гексогена плотностью $1,66$ г/см³ (масса 8 г). Ионизационные датчики располагались на расстоянии 40, 60 и 80 мм от плоскости инициирования. В целях сравнения проводились измерения и на зарядах диаметром 40 мм, изготовленных на основе смеси БТНЭН/Al(0,1). Датчики располагались на расстоянии 20, 40 и 60 мм от плоскости инициирования. Часть данных по скорости детонации получена в ходе испытаний по методике Т-20 [22] (отечественный вариант «цилиндр-теста»). Согласно этому методу заряд диаметром 20 мм помещался в медную цилиндрическую оболочку длиной 180 мм с толщиной стенки 2 мм. Иницирование осуществлялось таблеткой флегматизированного гексогена. Радиальная скорость разлета оболочки определялась оптическим методом (по отсечке на клине из оргстекла) с помощью скоростного фотрегистратора. Для определения скорости детонации использовали искровые датчики, наклеенные на боковую поверхность оболочки на расстоянии 30 и 140 мм от плоскости инициирования.

Определение параметров детонации составов на основе НГ проводилось на зарядах диаметром 40 мм. Образец состоял из промежуточной таблетки высотой $12 \div 14$ мм и двух таблеток общей высотой $35 \div 40$ мм, на которых и измерялась скорость детонации.

Во всех опытах с зарядами диаметром 40 мм инициирование осуществлялось плоско-волновым генератором из флегматизированного гексогена через промежуточную таблетку гексогена высотой 10 мм ($\rho_0 = 1,68$ г/см³).

Таблица 3

Скорость детонации

ВВ	Добавка (15 %)	ρ_0 , г/см ³	η	$\rho_{0,ВВ}$, г/см ³	D_{exp} , км/с	D^* , км/с	d , мм	
ОК	—	1,720	0,902	—	8,48	8,78	20**	
		1,812	0,951		8,78			
	Al(150)	1,891	0,947	1,795	8,66	8,71		
	Al(15)	1,881	0,943	1,784	8,61	8,70		
	Al(7)	1,871	0,938	1,774	8,55	8,67		
	Al(7)*	1,890	0,947	1,795	8,66	8,71		
	Al(0,5)	1,870	0,937	1,774	8,35	8,47		
	Al(п)	1,803	0,904	1,702	8,06	8,42		
	Al(п)	1,821	0,913	1,721	8,11	8,41		
	Al(0,1)	1,753	0,879	1,650	7,68	8,21		20
	Al(0,1)	1,820	0,912	1,721	7,95	8,25		
		Al(0,1)*	1,800	0,902	1,699	7,92		8,29
	LiF	1,770	0,890	1,671	8,18	8,64		
БТНЭН	—	1,870	0,954	—	8,50	8,62	20**	
		1,909	0,974		8,66			
	Al(150)	1,965	0,961	1,875	8,38	8,48		
	Al(15)	1,955	0,956	1,864	8,30	8,44		
	Al(7)				8,28	8,42		
	Al(0,1)	1,910	0,934	1,815	8,07	8,40		20
	Al(0,1)	1,900	0,930	1,805	7,92	8,29		
	Al(0,1)	1,914	0,936	1,820	8,04	8,35		40
Al(0,1)	1,830	0,895	1,731	7,66	8,32			
	LiF	1,931	0,946	1,842	8,21	8,44	20	
НГ	—	1,651	0,927	—	7,98	7,92	20**	
		1,635	0,918		7,94	7,94		
	Al(15)	1,743	0,929	1,640	7,94	7,92		
	Al(п)	1,720	0,916	1,616	7,78	7,86		
	Al(0,1)	1,785	0,951	1,684	8,13	7,93		40

Примечание. *ОК(кр); **заряды в медной оболочке (методика Т-20).

Таблица 4
Коэффициенты зависимости скорости детонации
взрывчатых основ от плотности

ВВ	a , км/с	b , (км·см ³)/(г·с)	$\rho_{0,ВВ}^*$, г/см ³
ОК	2,736	3,34	1,810
НГ	1,44	4,015	1,635
БТНЭН	1,24	3,885	1,900

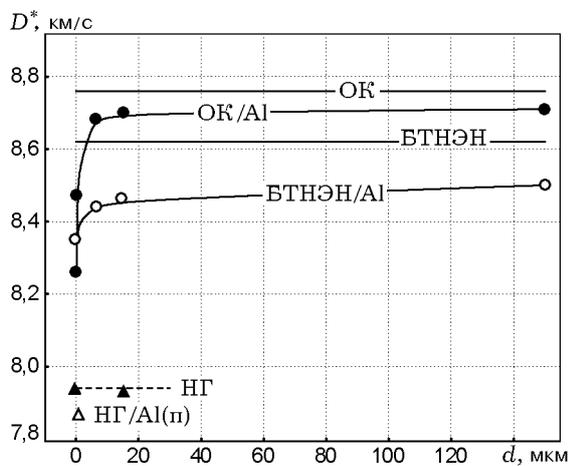


Рис. 1. Зависимость приведенной скорости детонации от размера частиц Al:

горизонтальные линии — скорости взрывчатых основ при $\rho = \rho_{0,ВВ}^*$

Иницирующая волна имела треугольный профиль давления. Выбранная система инициирования для составов на основе ОК и БТНЭН не приводит к заметному пересжатию на начальном этапе. Применение ее в экспериментах с НГ и смесями НГ/Al обусловлено низкой ударно-волновой чувствительностью НГ. Система инициирования по своим параметрам близка к использованной в [11, 17].

Данные по скорости детонации (D_{exp}) представлены в табл. 3, где ρ_0 и η — соответственно абсолютная и относительная плотности зарядов, $\rho_{0,ВВ}$ — плотность ВВ в заряде, d — диаметр заряда. Из-за различий физико-механических свойств смесей заряды незначительно отличались по плотности. Анализ результатов проводился по значениям приведенной скорости детонации D^* , которые соответствуют одной плотности каждого ВВ в заряде ($\rho_{0,ВВ}^*$). Экстраполяция осуществлялась в небольшом диапазоне плотностей с использова-

нием зависимости $D^* = D_{exp} - b(\rho_{0,ВВ} - \rho_{0,ВВ}^*)$. При этом предполагалось, что наклон зависимости скорости детонации от плотности для алюминизированных составов такой же, как и у взрывчатой основы ($D = a + b\rho_{0,ВВ}$). Значения $\rho_{0,ВВ}^*$, а также коэффициенты a и b , полученные на основе измерений авторов и данных работ [12, 17, 23], приведены в табл. 4. Зависимости скорости детонации D^* от размера частиц Al показаны на рис. 1.

Для составов на основе ОК уменьшение скорости D^* при введении LiF составляет 140 м/с. Это значение характеризует потери на сжатие и, возможно, на частичный прогрев добавки. Уменьшение D^* при добавлении Al(150), Al(15) и Al(7) в пределах ошибки измерений сопоставимо с эффектом от введения LiF. При добавлении порошков Al субмикронного размера наблюдается более заметное снижение D^* . Наименьшее значение скорости получено для композиции ОК/Al(0,1). Скорости детонации смесей, содержащих Al(п) и Al(0,5), совпадают в пределах экспериментальной ошибки. Близкие значения скорости получены и для композиций с Al(0,1), на основе ОК(кр) и ОК(м). По-видимому, в рассмотренных случаях различие в компоновке зарядов слабо влияет на скорость детонации.

Следует отметить, что по результатам измерений скоростей детонации смесей Al с ОК нельзя однозначно определить, реагирует Al или остается инертным в зоне, которая определяет скорость детонационной волны. Наблюдаемое снижение скорости с уменьшением размера частиц Al может быть связано как с возрастанием энергетических потерь на прогрев добавки, так и с уменьшением числа молей газообразных продуктов за счет взаимодействия Al с оксидами углерода.

Измеренное значение скорости детонации БТНЭН согласуется со значением 8,85 км/с (при плотности 1,96 г/см³), приведенным в [12]. Как и в случае с ОК, добавка Al снижает скорость детонации БТНЭН. Падение скорости в составах, содержащих алюминий микронного размера, сравнимо с эффектом от добавки LiF. Наибольшее снижение скорости получено при введении Al(0,1). Однако в последнем случае падение скорости составляет 280 м/с по сравнению с 500 м/с для аналогичной композиции с ОК. Этот результат, по-видимому, связан с окислением Al в зоне химической реакции детонационной волны. Можно предпо-

ложить, что $Al(0,1)$ взаимодействует со свободным кислородом продуктов детонации. Такая реакция уменьшает количество молей газообразных продуктов. Однако тепловой эффект существенно превосходит тепловыделение при взаимодействии Al с H_2O , CO_2 и CO (основными кислородсодержащими продуктами детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом).

В экспериментах с зарядами НГ диаметром 40 мм из-за мощного иницирующего импульса скорость детонации на первой базе превышала скорость, определенную на второй. Приведенные в табл. 3 значения получены на второй базе. В пределах ошибки эксперимента они совпадают со значениями, рассчитанными по зависимости из работы [17]. В экспериментах по методике Т-20 (диаметр заряда 20 мм) получены практически те же значения скоростей НГ, что и при измерениях в опытах с зарядами диаметром 40 мм. В то же время при испытаниях алюминизированных составов по методике Т-20 полноценной детонации достичь не удалось. При измерении скоростей детонации зарядов диаметром 40 мм пережатие на первой базе наблюдалось только для зарядов $HG/Al(p)$, характеризующихся наименьшей плотностью. Из полученных данных следует, что добавление Al к НГ практически не снижает скорости детонации. Это можно объяснить высоким содержанием водорода в молекуле НГ. Основным кислородсодержащим продуктом взрывчатого разложения НГ является H_2O , а реакция Al с H_2O (в отличие от взаимодействия с оксидами углерода) не снижает количества молей газообразных продуктов.

Из полученных результатов следует, что скорость детонации алюминизированных смесей зависит как от природы взрывчатой основы, так и от размера частиц Al . На фоне этой зависимости явного влияния структуры образцов на скорость детонации в рассмотренных случаях не обнаружено.

2.3. Измерение профилей температуры и давления

Профили температуры и давления регистрировались в экспериментах с зарядами диаметром 40 мм. Длина зарядов на основе ОК и БТНЭН составляла ≈ 45 мм, а на основе НГ — ≈ 50 мм. В экспериментах использовалась описанная выше система иницирования. Регистрация проводилась с помощью двухка-

нального оптического пирометра на двух эффективных длинах волн — $\lambda = 627$ и 420 нм. Временное разрешение системы регистрации не хуже 10 нс.

Яркостные температуры продуктов детонации измерялись на контактной границе исследуемых составов с оптическими кристаллами LiF . Для увеличения времени регистрации на кристаллы LiF (толщиной ≈ 8 мм) помещался глицерин, который также не теряет прозрачности в исследуемом диапазоне давлений.

Профили давления регистрировались с помощью индикаторной методики [24]. В качестве индикатора использовался бромформ, который помещался на торец зарядов. Изначально непрозрачные заряды ВВ просвечиваются мощным излучением детонационного фронта при его приближении к контактной границе. Чтобы отсечь это свечение, торец заряда обычно покрывают тонким слоем ($10 \div 15$ мкм) черного непрозрачного лака. Таким способом готовились сборки зарядов ОК и НГ. Торцевые поверхности зарядов БТНЭН из-за плохой адгезии к лаку покрывались специально подобранным непрозрачным органическим составом, толщина которого составляла менее 20 мкм.

Для бромформа известна ударная адiabата, а также зависимости интенсивности излучения и скорости звука от давления [24]. При использовании этой методики первичной информацией является изменение интенсивности излучения (давления) во времени на фронте ударной волны в индикаторе. Параметры фронта ударной волны однозначно связаны с характеристиками на контактной границе «продукты детонации — индикатор», которые, в свою очередь, определяются состояниями в продуктах [24]. Изменение давления на контактной границе приводит к адекватному изменению давления на фронте ударной волны в бромформе. Однако на фронте это изменение реализуется примерно в два раза медленнее. Таким образом, выбранная методика позволяет значительно повысить временное разрешение исследуемого процесса. Точность определения абсолютных значений давления около 3 %. Полученные результаты можно представлять в трех вариантах: в виде изменения давления на фронте ударной волны в индикаторе, на контактной границе «продукты детонации — индикатор» и в самих продуктах. Первые два варианта отличаются только временной шка-

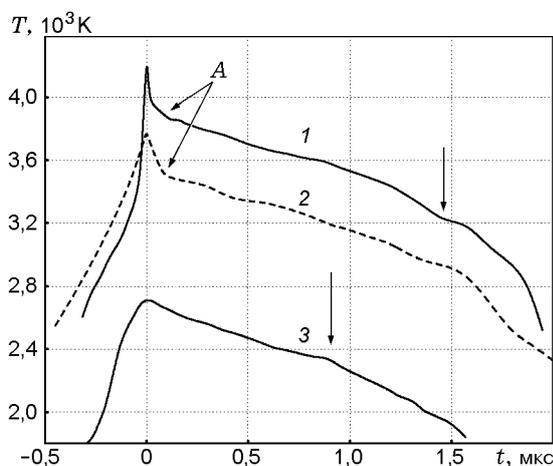


Рис. 2. Профили яркостной температуры при детонации различных зарядов:

1 — БТНЭН, $\rho_0 = 1,881 \text{ г/см}^3$; 2 — ОК, $\rho_0 = 1,802 \text{ г/см}^3$; 3 — НГ, $\rho_0 = 1,649 \text{ г/см}^3$; стрелками отмечены моменты прихода волн разрежения на контактную границу «продукты детонации — LiF», $\lambda = 627 \text{ нм}$, А — начало фиксации собственного излучения продуктов детонации ОК и БТНЭН

лой, давление соответствует состоянию в индикаторе. Выбор того или иного представления зависит от удобства сопоставления с другими экспериментальными данными. Например, при совместном анализе профилей давления и температур целесообразно рассматривать изменение давления на контактной границе с индикатором или в продуктах детонации.

2.3.1. Индивидуальные ВВ

Изменение яркостной температуры во времени при детонации зарядов БТНЭН ($\rho_0 = 1,881 \text{ г/см}^3$), ОК ($\rho_0 = 1,802 \text{ г/см}^3$) и НГ ($\rho_0 = 1,649 \text{ г/см}^3$) приведено на рис. 2. Излучение детонационного фронта начинает фиксироваться из глубины заряда до прихода волны на контактную границу. (Здесь и далее время отсчитывается от момента выхода детонационной волны на контактную границу ВВ — LiF.) Как показано в [25, 26], излучение детонационного комплекса в таких ВВ, как ОК, гексоген и тротил/гексоген, имеет сложный характер, вызванный тем, что основной вклад вносит люминесцентное излучение, которое превышает уровень теплового излучения продуктов детонации. При выходе детонационного комплекса на контактную границу регистрируется пик излу-

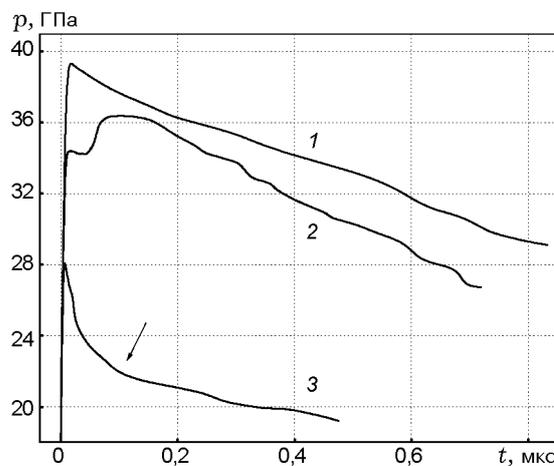


Рис. 3. Профили давления продуктов детонации различных зарядов:

1 — ОК, $\rho_0 = 1,808 \text{ г/см}^3$; 2 — БТНЭН, $\rho_0 = 1,881 \text{ г/см}^3$; 3 — НГ, $\rho_0 = 1,635 \text{ г/см}^3$; стрелкой показано примерное положение плоскости Чепмена — Жуге

чения, затем резкий спад, обусловленный переходом к тепловому излучению продуктов детонации. Если бы излучение детонационного комплекса имело только тепловую природу, то при взаимодействии с жестким оконным материалом наблюдался бы рост интенсивности излучения. Такая ситуация реализуется, например, на прессованных зарядах ТНТ [25, 26]. В нашем случае точка А на рис. 2 соответствует моменту, когда начинает фиксироваться собственное излучение продуктов детонации ОК и БТНЭН. Для НГ явно выраженного пика излучения при выходе детонационного комплекса на контактную границу не наблюдается.

Для каждого из исследуемых ВВ различие температур продуктов детонации на разных длинах волн лежит в пределах ошибки измерений, составляющей $100 \div 150 \text{ К}$. В целом, профили температуры являются спадающими и характеризуются близкой величиной наклона. Профиль температуры продуктов детонации НГ лежит заметно ниже, чем для ОК и БТНЭН (см. рис. 2).

Профили давления продуктов детонации представлены на рис. 3. Предварительные исследования прессованных образцов ОК показали немонотонную зависимость профилей давления от длины заряда [27]. В связи с этим на рис. 3 в качестве опорного приведен профиль, соответствующий длине заряда 110 мм. Химпик не зафиксирован.

Профиль давления продуктов детонации БТНЭН характеризуется небольшой «ступенькой», после чего вновь наблюдается незначительный подъем (см. рис. 3). Возможно, такой профиль отражает двухстадийность процесса выделения энергии при детонационном разложении БТНЭН.

На профиле давления, полученном при детонации НГ, имеется область повышенных давлений — зона химической реакции. Выбор точки перегиба, соответствующей плоскости Чепмена — Жуге, в достаточной мере субъективен [28]. Однако можно выделить некоторую область давлений (22,1 ÷ 21,6 ГПа), в которой находится плоскость Чепмена — Жуге. Выбранный диапазон соответствует показателю политропы 3,66 ÷ 3,77 и ширине зоны реакции 0,71 мм (90 нс) ÷ 1,00 мм (125 нс). Эти значения несколько ниже приведенных в литературе. Так, указанное в [29] давление детонации НГ при плотности 1,72 г/см³ равно 24,5 ГПа. Давления Чепмена — Жуге в работе [30] при плотности 1,629 г/см³ составили 25,6 и 23,8 ГПа в зависимости от выбора уравнения состояния (при этом значения показателя политропы равны соответственно 3,15 и 3,59). Таким образом, для НГ регистрируются достаточно высокая скорость детонации и относительно низкое давление Чепмена — Жуге, что характерно для ВВ с высоким содержанием водорода.

Следует подчеркнуть, что профили давления и температуры характеризуют тонкую структуру детонационной волны, а наблюдаемые особенности профилей в значительной мере отражают различие природы рассматриваемых ВВ.

2.3.2. Алюминизированные составы

Составы на основе ОК. Изменение давления на контактной границе «продукты детонации — бромформ» для алюминизированных смесей с ОК показано на рис. 4. Практически все композиции, содержащие ОК(кр), характеризуются двухпиковой структурой профиля давления. После вторичного подъема давление снижается, а наклон кривых для различных составов практически одинаков. Для состава с LiF получен спадающий профиль давления (рис. 4, б).

Двухпиковая структура профилей давления наблюдалась ранее [2, 31] для некоторых составов на основе ОК(кр) с добавлением Al

Таблица 5
Наличие или отсутствие двухпиковой структуры волны при детонации зарядов ОК/Al в зависимости от массового содержания и типа Al

Композиция	Содержание Al, %		
	5	15	25
	Результаты экспериментов		
ОК(кр)/Al(150)	—	—	+
ОК(кр)/Al(15)	+	+	+
ОК(кр)/Al(7)	—	+	+
ОК(кр)/Al(0,5)	+	+	+
ОК(кр)/Al(0,1)	—	+	*
ОК(м)/Al(0,1)	*	±	*
ОК(м)/Al(п)	*	+	*

Примечание. + — двухпиковая структура профиля,

— — ее отсутствие,

± — вырождение двухпиковой структуры,

* — опыты не проводились.

микронного размера^{*}. Как показано в [31], для системы ОК(кр)/Al(15) такая структура реализуется уже при незначительном содержании Al — 3 %. В указанных работах продемонстрирована также трансформация профиля давления при изменении содержания Al. Обобщенная информация о наличии или отсутствии двухпиковой структуры приведена в табл. 5.

Можно выделить ряд факторов, ответственных за появление двухпиковой структуры. Во-первых, это взаимодействие Al с продуктами детонации, интенсивность которого зависит от активности порошков Al и эффективной поверхности контакта компонентов. Во-вторых, это возможное изменение кинетики разложения ОК при контакте зерен ВВ с относительно холодными частицами металла. В-третьих, это особенности динамического течения, обусловленные скоростной неравновесностью и вовлечением в поток инертных частиц алюминия на начальном этапе формирования ударной волны.

Полученные данные позволяют проследить влияние структуры заряда. Так, степень неоднородности алюминизированных за-

^{*} Уточнение средних размеров частиц Al, проведенное в настоящей работе, показало, что вместо 50 и 20 мкм, указанных в [2, 31], средние размеры частиц были соответственно 15 и 7 мкм.

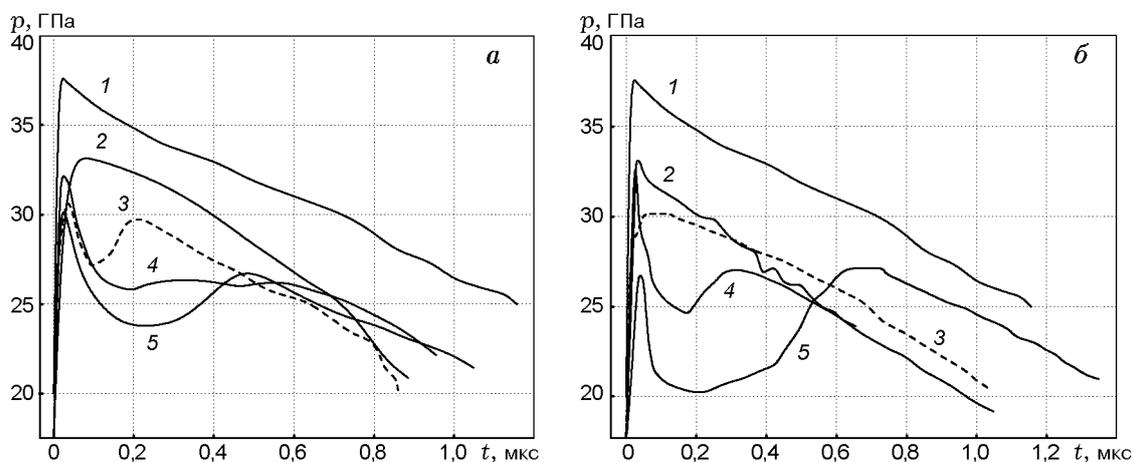


Рис. 4. Профили давления на контактной границе «продукты детонации — индикатор»:
 а: составы на основе ОК(кр): 1 — ОК, $\rho_0 = 1,808 \text{ г/см}^3$; 2 — ОК/Al(150), $\rho_0 = 1,885 \text{ г/см}^3$; 3 — ОК/Al(7), $\rho_0 = 1,870 \text{ г/см}^3$; 4 — ОК/Al(0,5), $\rho_0 = 1,867 \text{ г/см}^3$; 5 — ОК/Al(15), $\rho_0 = 1,881 \text{ г/см}^3$;
 б: 1 — ОК(кр), $\rho_0 = 1,808 \text{ г/см}^3$; 2 — ОК(кр)/LiF, $\rho_0 = 1,832 \text{ г/см}^3$; 3 — ОК(м)/Al(0,1), $\rho_0 = 1,831 \text{ г/см}^3$; 4 — ОК(кр)/Al(0,1), $\rho_0 = 1,796 \text{ г/см}^3$; 5 — ОК(м)/Al(п), $\rho_0 = 1,836 \text{ г/см}^3$

рядов на основе ОК(кр) выше, чем на основе ОК(м). Однако измерения скорости детонации для составов ОК(кр)/Al(0,1) и ОК(м)/Al(0,1) показали незначительное влияние дисперсности ОК (см. табл. 3). В то же время профили давления для зарядов ОК(кр)/Al(0,1) и ОК(м)/Al(0,1) качественно отличаются (см. рис. 4, б). В случае более однородной структуры ОК(м)/Al(0,1) наблюдается вырождение двухпикового профиля. Вместо спада давления после первого подъема следует небольшая область постоянного давления. Вместе с тем при 5 % Al(0,1) в зарядах ОК(кр) двухпиковой структуры также не зафиксировано (см. табл. 5). Наибольший по времени и глубине спад давления между пиками получен для зарядов ОК(м)/Al(п). Не исключено, что это вызвано не только низкой активностью порошка Al(п), но и особенностями структуры зарядов, содержащих алюминий с частицами в форме лепестков.

Сложные профили давления получены при детонации зарядов длиной 45 мм. Поэтому вопрос о стационарности распространения двухпикового профиля давления и его трансформации с изменением длины заряда остается открытым и требует дополнительного исследования.

Полученные профили температур приведены на рис. 5. Излучение из глубины заряда не фиксируется. Наблюдается существенное отличие профилей температуры для составов,

содержащих Al(0,1) и Al(п). Температура сначала возрастает (до момента времени 0,25 мкс), затем наблюдается практически постоянный уровень $\approx 3350 \text{ К}$ (до 1,2 мкс) для композиции с Al(0,1) или слабоспадающий профиль для составов с Al(п). При этом в обоих случаях температура выше, чем в продуктах детонации ОК. Необходимо отметить, что содержание чистого Al в этих порошках ниже, чем в Al(150), Al(15) и Al(7), но выше, чем в Al(0,5). Вид профилей температуры для ОК(м)/Al(0,1) и ОК(м)/Al(п) указывает на протекание экзотермической реакции. Для других композиций также характерны более пологие профили температуры, чем для чистого ОК (за исключением композиции с крупным алюминием Al(150)). Представленные профили температуры получены в отраженной волне сжатия. Измерения с использованием в качестве оконного материала LiF были проведены ранее для составов на основе ОК(кр), содержащих 5 ÷ 25 % частиц Al микронного размера [2]. С учетом ошибки измерения профили температуры для большинства алюминизированных составов лежали не выше профиля для чистого ВВ. Наблюдалась тенденция к уменьшению темпа спада температуры с увеличением массового содержания Al (за исключением состава с Al(150)), а для состава с 25 % Al(0,5) зарегистрирован постоянный уровень температур $\approx 2400 \text{ К}$ в интервале $t = 2,0 \div 4,0 \text{ мкс}$. Окна различной динамической сжимаемости использовались в [32] для исследова-

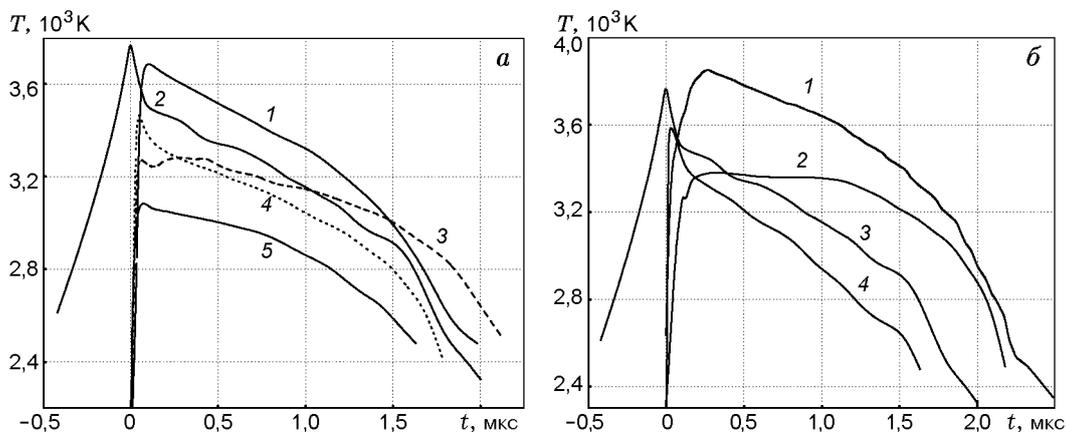


Рис. 5. Профили яркостной температуры на контактной границе «продукты детонации — LiF»:

а: составы на основе ОК(кр): 1 — ОК/Al(150), $\rho_0 = 1,891$ г/см³; 2 — ОК, $\rho_0 = 1,802$ г/см³; 3 — ОК/Al(15), $\rho_0 = 1,871$ г/см³; 4 — ОК/Al(7), $\rho_0 = 1,873$ г/см³; 5 — ОК/Al(0,5), $\rho_0 = 1,867$ г/см³;
 б: 1 — ОК(м)/Al(п), $\rho_0 = 1,860$ г/см³; 2 — ОК(м)/Al(0,1), $\rho_0 = 1,826$ г/см³; 3 — ОК(кр), $\rho_0 = 1,802$ г/см³; 4 — ОК(кр)/LiF, $\rho_0 = 1,833$ г/см³; $\lambda = 627$ нм

дования составов, содержащих 10 ÷ 40 % Al(15). Интересной особенностью записей в [32] является вторичный подъем температуры от уровня 2400 К, зафиксированный на зарядах с 20 и 40 % Al(15) при использовании в качестве окон глицерина и LiF соответственно. Совокупность всех данных, полученных по температурам продуктов детонации алюминизированных составов на основе ОК(кр), позволяет сделать вывод, что сферический Al микронного размера вступает во взаимодействие с продуктами на более поздней стадии, чем Al(п) и Al(0,1).

Составы на основе БТНЭН. Изменение давления на контактной границе «продукты детонации — индикатор» для составов на основе БТНЭН представлено на рис. 6. В отличие от системы ОК/Al, для БТНЭН/Al двухпиковая структура профиля не наблюдается. Возможно, это связано с различием процессов детонационного разложения ОК и БТНЭН, различиями в макрокинетике взаимодействия Al с продуктами детонации, а также с особенностями структуры зарядов на их основе.

Для БТНЭН на профиле давления в области нарастания имеется «ступенька». В случае смесей БТНЭН с Al(15) указанная особенность проявляется слабее, а для состава с Al(0,1) «ступенька» практически отсутствует и наблюдается монотонное нарастание давления. Введение более мелкого алюминия также приводит к уменьшению темпа спада давления.

Полученные профили давления не соот-

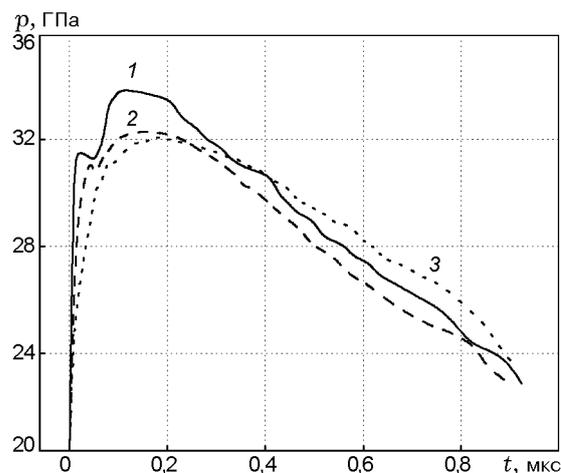


Рис. 6. Профили давления на контактной границе «продукты детонации — индикатор» при детонации зарядов различной структуры:

1 — БТНЭН, $\rho_0 = 1,881$ г/см³;
 2 — БТНЭН/Al(15), $\rho_0 = 1,967$ г/см³;
 3 — БТНЭН/Al(0,1), $\rho_0 = 1,924$ г/см³

ветствуют модели Зельдовича — Неймана — Дёринга. Вопрос об их стационарности остается открытым. Формально, в целях сравнения, можно провести пересчет максимальных значений давления в бромформе на давления в продуктах детонации согласно процедуре [24]. Скорости детонации D_{exp} , необходимые для пересчета, взяты из табл. 3. Полученные значения давлений p_{exp} , соответствующие на-

Таблица 6
Приведенные значения давления (p^*)
для составов на основе БТНЭН

Добавка Al	ρ_0 , г/см ³	p_{exp} , ГПа	p^* , ГПа
—	1,881	36,4	37,4
Al(15)	1,967	35,6	36,6
Al(0,1)	1,924	34,1	38,4

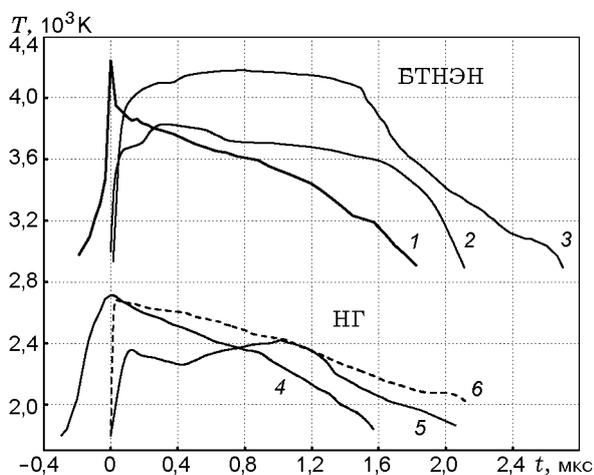


Рис. 7. Профили яркостных температур при детонации зарядов различной структуры:

1 — БТНЭН, $\rho_0 = 1,881$ г/см³; 2 — БТНЭН/Al(15), $\rho_0 = 1,975$ г/см³; 3 — БТНЭН/Al(0,1), $\rho_0 = 1,922$ г/см³; 4 — НГ, $\rho_0 = 1,649$ г/см³; 5 — НГ/Al(π), $\rho_0 = 1,728$ г/см³; 6 — НГ/Al(0,1), $\rho_0 = 1,778$ г/см³; в качестве оконного материала использовался LiF

чальной плотности заряда ρ_0 , представлены в табл. 6. В ней также указаны значения давления (p^*), приведенные к одной плотности ВВ в заряде (1,90 г/см³). При пересчете использованы скорости детонации D^* . Результаты оценки показали, что в пределах ошибки измерений максимальные давления в продуктах детонации алюминизированных составов совпадают с давлением в продуктах детонации БТНЭН.

Профили температуры продуктов детонации БТНЭН и смесей БТНЭН/Al приведены на рис. 7. Для алюминизированных составов в начале записи регистрируется небольшое плато, после которого температура вновь незначительно повышается. Для БТНЭН/Al(15) подъем температуры начинается через $\approx 0,25$ мкс, а для БТНЭН/Al(0,1) — через $\approx 0,4$ мкс. При этом температура продуктов детонации алю-

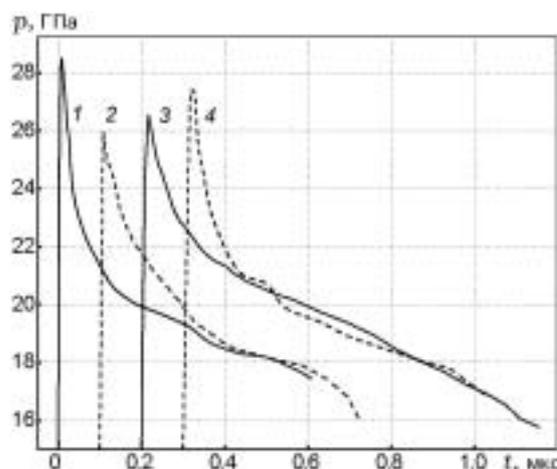


Рис. 8. Профили давления на контактной границе «продукты детонации — индикатор» при детонации зарядов НГ и композиций НГ/Al:

1 — НГ, $\rho_0 = 1,635$ г/см³; 2 — НГ/Al(15), $\rho_0 = 1,742$ г/см³; 3 — НГ/Al(π), $\rho_0 = 1,733$ г/см³; 4 — НГ/Al(0,1), $\rho_0 = 1,775$ г/см³; для алюминизированных зарядов начало каждой последующей записи сдвинуто на 0,1 мкс

минизированных составов выше, чем температура продуктов детонации БТНЭН. Отличительной особенностью полученных профилей является то, что они имеют вид протяженного плато. Падение температуры через $\approx 1,5$ мкс обусловлено приходом волны разрежения от контактной границы оконного материала с глицерином. Температура для системы БТНЭН/Al(0,1) превышает 4000 К. Таким образом, полученные профили температуры предполагают протекание интенсивного взаимодействия Al с продуктами детонации БТНЭН. Более высокая температура для системы БТНЭН/Al(0,1) свидетельствует о том, что Al(0,1) претерпевает более глубокое окисление в непосредственной близости от фронта волны, чем Al(15), несмотря на меньшее содержание чистого металла в порошке Al(0,1).

Составы на основе НГ. Изменение давления на контактной границе продуктов детонации зарядов НГ/Al с бромформом представлено на рис. 8. Профили для НГ и НГ/Al(0,1) практически совпадают. Введение Al(15) в НГ приводит к понижению пикового давления в бромформе, однако дальнейший ход зависимости близок к соответствующей записи для НГ. Несмотря на более низкую плотность и скорость детонации зарядов НГ/Al(π), профили давления в бромформе лежат выше профилей, полученных для

других композиций (за исключением пиковых значений).

Профили температур смесей НГ с Al приведены на рис. 7. Из полученных данных следует, что значения температур НГ и НГ/Al(0,1) на контактной границе с LiF практически совпадают. Однако с течением времени температура продуктов детонации НГ/Al(0,1) становится выше, чем у НГ. Через 1,5 мкс разница температур достигает 300 К, что свидетельствует о протекании реакции между Al(0,1) и продуктами. Температура продуктов детонации НГ/Al(п) в начале записи заметно ниже, однако с течением времени она повышается и становится практически равной температуре продуктов детонации состава с Al(0,1). Такой ход температурной кривой для композиции с Al(п) качественно согласуется с профилем давления (см. рис. 8), который, за исключением начального участка, лежит несколько выше других профилей. Очевидно, нарастание температуры свидетельствует об интенсивно развивающейся реакции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе экспериментальные результаты комплексного исследования алюминизированных составов на основе ОК, БТНЭН и НГ позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Введение Al(0,1) приводит к значительному увеличению чувствительности зарядов к механическим воздействиям (состав на основе БТНЭН близок по чувствительности к инициирующим ВВ).

2. Для составов на основе ОК и БТНЭН введение Al приводит к снижению скорости детонации. Причем при использовании Al с микронным размером частиц это снижение сопоставимо с уменьшением скорости детонации, вызванным разбавлением ВВ инертным LiF. Падение скорости детонации для зарядов ВВ/Al(0,1) превышает снижение скорости в зарядах ВВ/LiF. Однако в случае БТНЭН (ВВ с положительным кислородным балансом) относительное падение скорости детонации при введении ультрадисперсного Al меньше, чем в случае октогена (ВВ с отрицательным кислородным балансом). Для алюминизированных составов на основе НГ (ВВ с высоким содержанием водорода) скорость детонации практически не снижается.

3. Измеренные профили давления БТНЭН указывают на возможность двухстадийного процесса выделения энергии при разложении этого ВВ в детонационной волне. Для НГ проведена оценка ширины зоны химической реакции, давления и показателя политропы в плоскости Чепмена — Жуке.

4. Максимальные давления в составах на основе ОК снижаются с введением Al, при этом для большинства композиций получена двухпиковая структура. В составах на основе БТНЭН и НГ двухпиковая структура отсутствует. Максимальные давления продуктов детонации БТНЭН и БТНЭН/Al в пределах ошибки эксперимента совпадают. Добавка Al к НГ практически не изменяет ни вид профилей, ни значения давлений (за исключением пиковых). Более того, при введении пудры Al(п) давление повышается.

5. Высокие температуры продуктов детонации вблизи детонационного фронта, полученные для смесей с Al(п) и Al(0,1), свидетельствуют о том, что основным фактором, определяющим начальную стадию окисления металла, является эффективная поверхность частиц Al в заряде.

Авторы благодарны сотрудникам ИНЭПХФ РАН И. О. Лейпунскому и А. Н. Жигачу за помощь в исследовании структуры составов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаев Б. С., Хасаинов Б. А., Боден Ж., Прель А.-Н. Поведение алюминия при детонации вторичных ВВ. Сюрпризы и интерпретации // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 6. С. 60–69.
2. Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., and Baudin G. Detonation waves in HMX/Al mixtures (Pressure and temperature measurements) // Proc. Eleventh Intern. Detonation Symp., August 31 — September 4, 1998, Snowmass, Colorado, USA / J. Short (Ed.). 2000. P. 979–988.
3. Архипов В. И., Махов М. Н., Пепкин В. И., Щетинин В. Г. Исследование детонации алюминизированных ВВ // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 12. С. 53–57.
4. Lefrancois A., Grouffal J. Y., and Bouinot P., Mencacci S. Temperature and pressure measurements of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion // Twelfth Intern. Detonation Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California / Electronic version at the server:

- <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technicalProgram.htm>
5. **Milne A. M., Longbottom A. W., Evans D. J., et al.** The burning rate of aluminium particles in nitromethane in cylinder tests // *Ibid.*
 6. **Miller P. J., Bedford C. D., and Davis J. J.** Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallized explosives // *Proc. Eleventh Intern. Detonation Symp., August 31 – September 4, 1998, Snowmass, Colorado, USA / J. Short (Ed.). 2000. P. 214–220.*
 7. **Baudin G., Lafrancois A., Bergues D., et al.** Combustion of nanophase aluminium in the detonation products of nitromethane // *Ibid.* P. 989–997.
 8. **Brousseau P., Dorsett H., and Cliff M., Anderson J.** Detonation properties of explosives containing nanometric aluminium powder // *Twelfth Intern. Deton. Symp., August 11–16, 2002, San Diego, California / Electronic version at the server: <http://www.sainc.com/onr/detsymp/technicalProgram.htm>*
 9. **Lefrancois A., Baudin G., Le Gallic C., et al.** Nanometric aluminum powder influence on the detonation efficiency of explosives // *Ibid.*
 10. **Дубнов А. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.** Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988.
 11. **Хмельницкий Л. И.** Справочник по взрывчатым веществам. М.: ВИА им. Дзержинского, 1962. Ч. II.
 12. **Kamlet M. J. and Hurwitz H.** Chemistry of detonations IV. Evaluation of a simple prediction method for detonation velocities of C–H–N–O explosives // *J. Chem. Phys.* 1968. V. 48, № 8. P. 3685–3692.
 13. **Бобров А. Н., Ягдников Д. А., Попов И. В.** Воспламенение и горение двухкомпонентной газовой смеси порошкообразных горючего и окислителя // *Физика горения и взрыва.* 1992. Т. 28, № 5. С. 3–7.
 14. **Порошки цветных металлов: Справочник /** Под ред. С. С. Набойченко. М.: Металлургия, 1997.
 15. **А. с. 814432 СССР.** Способ получения аэрозолей металлов // *Ген М. Я., Миллер А. В. Бюл. изобрет.* 1981. № 11.
 16. **Жигач А. Н., Лейпунский И. О., Кусков М. Л. и др.** Установка для получения и исследования физико-химических свойств наночастиц металлов // *Приборы и техника экспериментов.* 2000. № 6. С. 122–129.
 17. **Price D. and Clairmont A. R.** Explosive Behavior of Nitroguanidine // *Proc. Twelfth Symp. (Intern.) on Combustion. Poitiers, France, July 14 to 20, 1968. The Combustion Inst., 1969. P. 761–770.*
 18. **Щетинин В. Г.** Оценка механической чувствительности твердых взрывчатых веществ по методу разрушающейся оболочки // *Физика горения и взрыва.* 1999. Т. 35, № 5. С. 116–121.
 19. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К., Долгов В. И. и др.** К механической чувствительности инициирующих взрывчатых веществ // *Горение и взрыв. Материалы Четвертого Все-союз. симпоз. по горению и взрыву. М.: Наука, 1977. С. 485–489.*
 20. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Иницирование твердых ВВ ударом. М.: Наука, 1968.
 21. **Боуден Ф. Ф., Иоффе А. Д.** Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
 22. **Физика взрыва /** Под ред. Л. П. Орленко. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Физматлит, 2002. Т. 1.
 23. **Шалл Р.** Физика детонации // *Физика высоких плотностей энергии: Пер. с англ. М.: Мир, 1974.*
 24. **Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю.** Индикаторный метод исследования ударных и детонационных волн // *Хим. физика.* 1994. Т. 13, № 12. С. 118–127.
 25. **Gogulya M. F., Brazhnikov M. A.** Radiation of condensed explosives and its interpretation (temperature measurements) // *Proc. 10th Intern. Symp. on Deton., Boston-1993. Office of Naval Research, ONR 33395-12. 1995. P. 542–548.*
 26. **Гоголя М. Ф., Бражников М. А.** Температуры продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ. I. Твердые ВВ // *Хим. физика.* 1994. Т. 13, № 1. С. 52–63.
 27. **Гоголя М. Ф., Бражников М. А., Долгобородов А. Ю.** Особенности детонации пресованных зарядов октогена // *Физика горения и взрыва.* 2000. Т. 36, № 4. С. 83–86.
 28. **Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф.** Свечение ударного фронта вблизи границы с детонирующим зарядом // *Хим. физика.* 1984. Т. 3, № 7. С. 1036–1041.
 29. **Hobbs M. L. and Baer M. R.** Calibrating the BKW-EOS with a large product species database and measured C–J properties // *Proc. 10th Intern. Symp. on Detonation, Boston-1993. Office of Naval Research, ONR 33395-12. 1995. P. 409–418.*
 30. **Мейдер Ч.** Численное моделирование детонации. М.: Мир, 1985.
 31. **Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А.** Тонкая структура детонационных волн в смесях октогена с алюминием // *Хим. физика.* 1998. Т. 17, № 1. С. 41–44.
 32. **Гоголя М. Ф., Бражников М. А.** О температурах продуктов детонации металлизированных ВВ // *Хим. физика.* 1996. Т. 15, № 12. С. 96–99.

*Поступила в редакцию 20/III 2003 г.,
в окончательном варианте — 16/XII 2003 г.*