

АЛЮМИНИЗИРОВАННЫЕ ЛИТЬЕВЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА (ОБЗОР)

П. П. Вадхе, Р. Б. Павар, Р. К. Синха, С. Н. Астана, А. Субхананда Рао

Лаборатория исследования высокоэнергетических материалов, 411021 Пуна, Индия
hemsociety@rediffmail.com

Выполнен обзор текущего состояния и тенденций развития алюминизированных взрывчатых веществ (ВВ). Основное внимание уделено литьевым композициям, к которым относятся как плавящиеся композиции на основе тринитротолуола (TNT), так и пастообразные композиции на основе полимеров. Детально рассмотрены хорошо изученные алюминизированные композиции на основе гексогена и октогена, в которых в качестве связующего использован TNT. Разными исследователями предложено оптимальное с точки зрения скорости детонации содержание алюминия в диапазоне 15 ÷ 20 %. Однако большинство композиций имеет более высокое содержание алюминия для создания продолжительного взрывного действия, обусловленного вторичными реакциями алюминия с продуктами детонации. На параметры взрыва (скорость детонации и др.) также оказывает влияние размер частиц алюминия. В настоящее время проводятся работы с наноразмерным алюминием, полученные результаты демонстрируют неоднозначные тенденции для композиций на основе гексогена и TNT. Композиции с использованием TNT и нитротриазола служат основой для создания боеприпасов пониженного риска. Очень интересные результаты получены для композиций, содержащих динитрамид аммония и бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин (BTNEN). Выявлено превосходство композиций с полимерным связующим по сравнению с традиционными ВВ на основе TNT. В частности, пластические ВВ имеют низкую уязвимость. Вообще, алюминизированные пластические ВВ нашли широкое применение в подводных приложениях. Перхлорат аммония (AP) включают в состав композиций, в частности, для усиления подводной ударной волны и энергии пузыря газообразных продуктов взрыва. В качестве связующего обычно выбирают полибутадиев с концевыми гидроксильными группами, однако исследуются и другие: нитроцеллюлоза; полиэтиленгликоль; капролактоновый полимер с энергетическими пластификаторами, например BDNPA/F; триэтиленгликольдинитрат; триметиллоэтантринитрат. Композиции на основе полиэтиленгликоля и капролактона имеют низкую уязвимость, особенно при ударных воздействиях. Очень малочувствительные пластические ВВ на основе нитротриазола разрабатываются во многих странах мира. Низкочувствительная комбинация CL-20/AP отвечает требованиям высокой плотности заряда и высокой скорости детонации. Глицидилазидный полимер и полинитрометилметиллоксетан, по-видимому, также представляют интерес для использования в пластических ВВ вследствие их превосходной энергетики. Однако необходимы детальные исследования чувствительности таких композиций. Представлена краткая информация о ВВ с полимерным связующим и о термобарических гелеобразных ВВ.

Ключевые слова: PBX, НТРВ, CL-20, FOX-7, RDX, HMX, НТО, тринитротолуол, октоген, гексоген, алюминий, размер частиц, скорость детонации, малочувствительные боеприпасы, боеприпасы пониженного риска.

Названия веществ

ADN — ammonium dinitramide = динитрамид аммония (АДНА)
AN — ammonium nitrate = нитрат аммония
AP — ammonium perchlorate = перхлорат аммония (ПХА)

BTNEN — bis(2,2,2-trinitroethyl) nitramine = бис(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин

BDNPA/F — bis-dinitropropyl acetal/formal (1/1 mix) = смесь 1 : 1 BDNPA (бис(2,2-динитропропил)ацетала) и BDNPF (бис(2,2-динитропропил)формала)

CB — Carbon black = сажа

CL-20 — hexanitrohexaazaisowurtzitane = гексанитрогексаазаизовурцитан

Р. П. Vadhe, R.B. Pawar, R.K. Sinha, S. N. Asthana, A. Subhananda Rao.
High Energy Materials Research Laboratory, Pune 411021, India.

- D2 Wax — desensitized wax = десенсибилизированный парафин (84 % indramic wax 170C, 14 % nitrocellulose = нитроцеллюлоза, 2 % lecithin = лецитин)
- DES N-100 или Desmodur N-100 — торговое название polyisocyanate = полиизоцианат; aliphatic polyisocyanate = алифатический полиизоцианат
- DOA — dioctyl adipate = диоктиладипат (пластификатор)
- EIDS — extremely insensitive detonating substances = вещества с экстремально низкой способностью к детонации
- Ethyl Cellulose = этилцеллюлоза
- FOX-7 — 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene = диаминодинитроэтилен
- GAP — glycidyl azide polymer = глицидил-азидный полимер
- IDPI — isophorone-diisocyanate = изофорон-диизоцианат (отвердитель)
- IPN — isopropyl nitrate = изопропилнитрат
- HBX — high blast explosive = бризантное взрывчатое вещество
- HMX — cyclotetramethylene tetranitramine = циклотетраметилентетранитрамин (октоген)
- I-800 Ganex — парафин Indramic-800, поверхностно-активное вещество Ganex (98.5/1.5)
- K-10 — энергетический пластификатор, dinitroethylbenzene/2,4,6-trinitroethylbenzene, 65/35 = динитроэтилбензол/три-нитроэтилбензол
- Laminac-styrene — полиэфирно-полистирольное связующее (Laminac — торговое название полиэфирного связующего, используемого в пиротехнике)
- MNAMMO — 3-methylnitramino-methyl-3-methyloxetane = 3-метилнитраминометил-3-метилоксетан
- NC — nitrocellulose = нитроцеллюлоза
- NG — nitroglycerine = нитроглицерин
- NM — nitromethane = нитрометан
- NMMO — 3-nitratomethyl-3-methyl oxetane = 3-нитратометил-3-метилоксетан
- NTO — 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one = нитротриазол
- PBX — plastic bonded explosives = взрывчатые вещества с полимерным связующим (пластические ВВ)
- PCP — poly(caprolactone) = поликапролактон
- PDNPA — 2,2-dinitropropylacrylate polymer = 2,2-динитропропилакрилат полимер
- PEG — полиэтиленгликоль
- PETN — pentaerythritol tetranitrate = пентаэритритолтетранитрат (тэн)
- PGN — polyglycidyl nitrate = полиглицидил-нитрат
- PolyNIMMO — polynitromethylmethyloxetane = полинитрометилметилоксетан
- PVN — polyvinyl nitrate = поливинилнитрат
- PU — polyurethane = полиуретан
- RDX — cyclotrimethylene trinitramine = циклотриметилентринитрамин (гексоген)
- TEGDN — triethylene glycol dinitrate = триэтиленгликольдинитрат
- TMETN — trimethylolethane trinitrate = триметилолэтантринитрат
- TNT — trinitrotoluene = тринитротолуол
- Viton = Витон — торговое название vinylidene fluoride-perfluoropropylene copolymer = сополимер фторида винилдиена и перфторпропилена

ВВЕДЕНИЕ

Появление RDX и HMX обеспечило значительный прогресс в развитии бризантных взрывчатых веществ. Использование RDX и HMX в традиционных литьевых композициях, основанных на TNT, способствует увеличению скорости детонации взрывчатого вещества (ВВ) благодаря превосходным характеристикам этих компонентов по теплоте образования, кислородному балансу и плотности. Это влечет за собой увеличение скорости осколков и кинетической энергии боеголовок. Для повышения импульса, приводящего к улучшению дробящего и кратерообразующего эффектов, требуется вводить металлические порошки (Al, B, Zr), обычно применяют алюминий [1–3]. В [4] приведен обзор использования алюминиевого порошка в пластических ВВ и установлены его возможности в качестве компонента, повышающего энергию взрыва.

Впервые использование алюминия для улучшения взрывных характеристик было запатентовано в 1900 г. [1]. В [5] проведены всесторонние исследования, направленные на определение влияния содержания алюминия на характеристики взрывчатой композиции. Сегодня в мире имеются алюминиевые порошки различных форм и размеров — от хлопьев (MIL-A-512) до сферических частиц (< 10 мкм) (MIL-A-23950). В последнее время повышенный интерес вызывает наноразмерный алюминий.

В случае участия алюминия во вторичных реакциях в области тейлоровского разложения за детонационной волной классические программы термохимических расчетов, основанные на уравнениях состояния продуктов взрыва Джонса — Уилкинса — Ли (JWL) или Беккера — Кистяковского — Вильсона (BKW), не обеспечивают точного описания детонации. Как следствие, предсказание характеристик таких неидеальных ВВ является сложной задачей. В последние три десятилетия продолжались исследования, направленные на углубление понимания химических, термодинамических и гидродинамических взаимодействий продуктов разложения смесевых ВВ. Общепринято, что в плоскости Чепмена — Жуге реакция алюминия замедляется из-за наличия на частицах алюминия оксидной пленки Al_2O_3 с высокой температурой плавления (2030 °С), которая препятствует его реагированию. Таким образом, большое количество энергии выделяется при протекании последующих реакций алюминия с первичными продуктами детонации бризантных ВВ, что обеспечивает более длительное сохранение высокого давления [6]. В конечном итоге введение алюминия в бризантные ВВ приводит к усилению эффектов последствий, таких как более высокие температура и зажигательная способность, воздушный удар и разрушительная способность, обусловленная энергией пузыря при подводном взрыве [7].

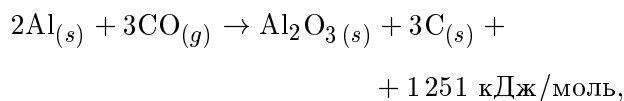
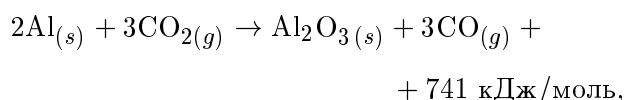
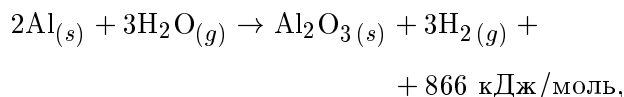
Детальные исследования показали, что скорость детонации литевых зарядов непрерывно убывает при добавке алюминия свыше 20 % [8–10]. Установлено, что теплота взрыва Q_v растет с увеличением содержания алюминия C_{Al} [11], в то время как объем газообразных продуктов V_0 убывает (табл. 1). Величина $Q_v V_0$ достигает максимума при введении 18 % алюминия, а его оптимальное со-

Таблица 1
Влияние содержания алюминия на теплоту взрыва и объем газообразных продуктов для композиций TNT/Al

C_{Al} , %	Q_v , кДж/кг	V_0 , л/г	$Q_v V_0$, 10^4 кДж · л/кг ²
0	4 226	0.750	318
9	5 188	0.693	360
18	6 485	0.586	381
25	7 280	0.474	343
32	7 657	0.375	289
40	8 452	0.261	222

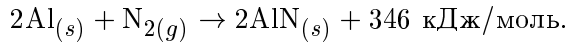
держание принято равным 20 %. Тем не менее взрывчатые композиции с более высоким содержанием алюминия представляют интерес для осуществления воздействия взрывной волной. Бризантность алюминизированных составов растет при увеличении содержания алюминия вплоть до 70 % [9]. Такие составы также представляют интерес для подводных работ.

Ниже приведены основные химические реакции с участием алюминия, обеспечивающие ударный эффект при взрыве:



индекс s соответствует твердой фазе, g — газообразной.

Регистрация зависимостей давления от времени показывает, что давление, достигаемое при взрыве алюминизированных композиций, относительно меньше, но поддерживается в течение более длительного времени (в 2–3 раза), чем в случае неалюминизированных композиций, благодаря экзотермической реакции алюминия с продуктами детонации в области за зоной реакции во фронте детонационной волны [12]. Общеизвестно, что алюминий реагирует не только с кислородсодержащими составляющими продуктов детонации, но и с азотом с образованием нитрида алюминия AlN:



В приведенных реакционных схемах предполагается, что окисление алюминия может происходить с восстановлением H_2O до H_2 и восстановлением CO_2 до CO или твердого углерода C . Расчеты по модели ВКВ не показывают образования твердого углерода. Однако в [13] экспериментально обнаружено существенное участие алюминия в восстановлении твердого углерода из CO_2 . Основываясь на результатах анализов продуктов детонации, проведенных в [13], авторы [14] пришли к заключению, что в реакциях с алюминием восстанавливается только 18 % молярной доли H_2O и до 50 % молярной доли CO_2 . При такой схеме реакций энергетический вклад алюминия Q_{Al} составляет 20.126 МДж на килограмм алюминия. На основе экспериментальных данных и термодимических расчетов в [15] разработана эмпирическая модель реагирующего потока при детонации и горении, учитывающая кинетику реакций. В [14] было изучено реакционное поведение бризантных ВВ на основе алюминия, НМХ и АР и предложена модель для предсказания действия бризантных ВВ при мелкомаштабных надземных и подводных взрывах.

Несмотря на широкое применение в настоящее время алюминизированных взрывчатых композиций с включением RDX и НМХ и использованием TNT в качестве связующего, ведутся разработки нечувствительных боеприпасов (insensitive munition, IM) или боеприпасов пониженного риска (munitions with attenuated risk, MURAT), которые не детонируют ни при каких других условиях, кроме как при попадании снаряда в цель. В IM используют полимерное связующее вместо TNT. Требуется, чтобы боеприпасы были нечувствительны к попаданию высокоскоростных осколков или пуль, а при повышенной температуре, вызванной огнем, горели, а не детонировали. Безопасность нечувствительных боеприпасов при упаковке, хранении и транспортировке значительно выше по сравнению с обычными боеприпасами.

1. ТРАДИЦИОННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ TNT

1.1. Композиции TNT/Al

Хорошо известная алюминизированная взрывчатая композиция тритонал состоит из

Таблица 2
Сравнительная характеристика TNT и тритонала

Физические свойства	TNT	TNT/Al (80/20)
Молекулярная масса	227	—
Кислородный баланс, %	-73.9	-72
Теплота образования, кал/г	-44.2	-44.2
Энтальпия образования, кал/г	-62.5	—
Энергия взрыва, кал/г	1 210	1 770
Плотность, г/см ³	1.654	1.71 ÷ 1.78 (теоретическая 1.793)
Температура разложения, °C	240	—
Скорость детонации, км/с	6.9	6.52 при $\rho = 1.77 \text{ г/см}^3$
Ударная чувствительность, см (груз 2 кг)	90	84
Пиковое давление, ГПа	17.8	11.0

80 % TNT и 20 % частиц алюминия чешуйчатой формы [16]. Тритонал был разработан и стандартизован в США во время Второй мировой войны и характеризуется улучшенным взрывным эффектом. Физические свойства и параметры взрыва тритонала (80/20) подробно описаны в литературе [17–19] и представлены в табл. 2.

Тритонал является композицией общего назначения со средними параметрами для использования в дробящих и создающих ударную волну боеприпасах, главным образом в бомбах

Таблица 3
Влияние размера частиц Al на системы TNT/Al

C_{Al} , %	a , мкм	ρ , г/см ³	D , км/с	Q_d , кДж/кг
10	12	1.67	5.72	5 307
	Alex		6.51	5 479
30	21	1.82	5.74	6 184
	12		6.23	6 519
	2		6.48	6 660
	Alex		6.63	6 749

Таблица 4

Характеристики алюминизированных систем RDX/HMX/TNT

ВВ	ρ , г/см ³	D , км/с	p , ГПа	ΔH_f , кДж/моль	G_C , м/с
Состав В: RDX/TNT/Wax 59/40/1	1.68	7.50	29.3	3.35	2 680
Циклотол: RDX/TNT 70/30	1.71	8.06	32.0	-11.60	2 710
Дентекс: RDX/TNT/Al/Wax 48.5/33.5/18/0.5 (парафин сверх 100 %)	1.75	7.78	—	—	—
Торпекс: RDX/TNT/Al 42/40/18	1.81	7.60	23.2	0.59	2 710
Н-6: RDX/TNT/Al/D2 Wax 45.1/29.2/21.0/4.7	1.76	7.49	24.5	-4.56 [24]	2 620
НВХ-1: RDX/TNT/Al/D2 Wax 40.4/37.8/17.1/4.7	1.712	7.31	22.0	-8.25 [22, 23]	2 470
НВХ-3: RDX/TNT/Al/D2 Wax 31.3/29.0/34.8/4.9	1.85	7.53 [24]	20.6	-8.71 [25]	2 230
Тритонал: TNT/Al 80/20	1.72	6.52	20.9	-22.11	2 320
Дестекс: TNT/Al/D2 Wax/CB 74.7/18.7/4.7/1.9	1.69	6.74	17.9	-29.64 [26]	—

Примечание. p — максимальное давление в волне детонации.

военно-морских и военно-воздушных сил [4]. Тритонал пониженной чувствительности получил название дестекс (destex).

С использованием лазерного интерферометра Фабри — Перо в [20] было изучено влияние размеров частиц алюминия a на скорость тепловыделения. В работе [21] показано, что введение наноразмерного алюминия Alex в систему TNT/Al приводит к заметному росту как скорости детонации D , так и теплоты детонации Q_d (табл. 3).

1.2. Алюминизированные композиции RDX/TNT

Этот класс взрывчатых композиций существенно превосходит тритонал по ряду характеристик и широко применяется в настоящее время. Несмотря на уменьшение скорости детонации при введении алюминия в состав В, теплота детонации повышается (табл. 4) [22, 23]. При этом сравнение значений констант Гарни* (G_C) для алюминизированных и неалюминизированных взрывчатых композиций демонстрирует внутренне противоречивые тенденции. Так, для торпекса (18 % Al) и безметалльного циклотола значение $G_C = 2710$ м/с выше, чем у чистого RDX и состава В — $G_C = 2680$ м/с. С другой стороны, алюминизированные композиции Н-6, НВХ-1, НВХ-3 и тритонал имеют меньшие значения G_C по сравнению

*Энергетический коэффициент, рассчитанный на единицу массы заряда ВВ, характеризующий скорость движения осколков фрагментирующего корпуса.

Таблица 5

Композиции на основе состава В: влияние размера частиц алюминия на скорость и теплоту детонации

Тип смеси	Al, %	a , мкм	ρ , г/см ³	D , км/с	Q_d , кДж/кг
Состав В	0	—	1.69	7.89	5 389
Состав В/Al	10	21	1.74	7.74	5 621
Состав В/Al	10	12	1.74	7.74	5 816
Состав В/Al	10	2	1.74	7.68	6 004
Состав В/Al	10	Alex	1.74	7.60	5 927

с неалюминизированным составом В.

Дентекс, торпекс, Н-6, НВХ-1 и НВХ-3 — примеры хорошо известных алюминизированных циклотол-композиций на основе RDX/TNT. Дентекс, торпекс и Н-6, как и тритонал, являются взрывчатыми композициями общего назначения, тогда как НВХ-1 и НВХ-3 находят применение в подводных минах и торпедах. Для получения максимальной энергии пузыря предпочтителен НВХ-3.

Введение наноразмерного алюминия в состав В вместо микронного алюминия приводит к уменьшению скорости детонации, тогда как в случае TNT, напротив, это приводит к ее увеличению. Теплота детонации состава В растет с уменьшением размеров частиц алюминия, как и в случае тритонала (табл. 5) [27–29].

Таблица 6

Алюминизированные композиции НМХ/TNT

ВВ	ρ , г/см ³	D , км/с	p , ГПа	ΔH_f , ккал/моль	G_C , м/с
Октол: НМХ/TNT 70/30	1.72	8.40	—	—	—
НТА-3: НМХ/TNT/Al 49/29/22	1.946	7.87	—	1.05 [30]	—
Н-6: RDX/TNT/Al/D2 Wax 45.1/29.2/21.0/4.7	1.76	7.49	24.5	-1.09 [24]	2 620

Таблица 7

Характеристики композиций НМХ/Al в зависимости от размера и содержания алюминия [31]

a , мкм	C_{Al} , %	ρ , г/см ³	ρ/ρ_{max} , %	D , км/с	p_{max} , ГПа
Чистый НМХ	—	1.81	—	8.76	43.2
150	5	1.84	95	8.74	38.8
	15	1.89	95	8.66	36.3
	25	1.95	95	8.55	32.1
50	5	1.84	95	8.73	33.5 ± 0.2
	15	1.88	94	8.63	
	25	1.93	94	8.44	
20	5	1.83	95	8.72	40.0
	15	1.87	94	8.55	35.0
	25	1.92	93	8.37	35.0
0.5	5	1.84	95	8.66	40.2
	15	1.87	94	8.35	34.5
	25	1.91	93	7.97	24.5

1.3. Алюминизированные композиции на основе НМХ

В соответствии с общей тенденцией введение алюминия в композиции НМХ/TNT также приводит к уменьшению скорости детонации (табл. 6). Октол с алюминием, названный НТА-3, находит применение благодаря сочетанию бризантности и способности оказывать взрывное воздействие [30].

В работе [31] изучалось влияние размера частиц и содержания алюминия на профили температуры и давления для композиций НМХ/Al (табл. 7). Взаимодействие алюминия с продуктами детонации НМХ регистрировали во взрывной камере двухканальным пирометром через окно из LiF.

Результаты [31] показывают, что скорость детонации имеет большее значение в случае частиц алюминия размером $a = 150$ мкм. Однако пиковые давления для композиций с частица-

ми размером $a = 150, 20$ и 0.5 мкм сопоставимы. Было также обнаружено, что введение в НМХ 5 % алюминия не изменяет либо незначительно увеличивает температуру продуктов детонации (для чистого НМХ 3772 °С) в первую микросекунду независимо от размера частиц алюминия. Однако увеличение содержания алюминия приводит к уменьшению температуры продуктов детонации ниже уровня, характерного для чистого НМХ, кроме случая смеси с 25 % 150-микронного алюминия. Это объясняется тем, что энергия, затрачиваемая на нагрев алюминия, компенсируется теплом, выделяемым при окислении до 5 % алюминия. Замечено, что важное значение имеет соотношение размеров частиц алюминия и НМХ. Частицы НМХ размером меньше, чем у частиц алюминия ($a = 150$ мкм), окружают последние и становятся доступными для детонации. Если размер частиц алюминия $a = 0.5$ мкм, то частицы НМХ, будучи относительно крупными, покрываются слоем частиц алюминия, что приводит к подавлению разложения НМХ во фронте волны детонации. Это проявляется в более медленном падении давления в случае композиций со 150-микронным алюминием.

1.4. Алюминизированные композиции с PETN

В случае систем PETN/Al наибольшая скорость детонации также реализуется для композиций с наименьшим содержанием алюминия (табл. 8).

Таблица 8

Взрывные параметры систем PETN/Al [20]

PETN/Al, %	ρ , г/см ³	D , км/с	p_{CJ} , ГПа
100/0 [32]	1.67	7.98	31.0
95/5	1.78	8.10	32.0
90/10	1.80	8.00	32.5
80/20	1.89	7.80	32.0

Таблица 9

Чувствительность и характеристики алюминизированных литевых композиций TNT/NTO

Состав NTO/TNT/Al/связующее	ρ , г/см ³	D , км/с	d_{cr} , мм	$H_{50\%}$, см	H	H_e , Дж
TNTO 0 38/40/16/6 (D2 Wax)	—	—	—	>200.5	41.2	0.040
TNTO I 42/34/19/5 (D2 Wax)	1.76	6.67	25 ÷ 51	>200.5	—	—
TNTO II 42/32/19/7 (D2 Wax)	1.74	6.84	32 ÷ 35	>200.5	53.0	0.040
TNTO III 42/30/19/9 (D2 Wax)	—	—	—	>200.5	—	—
TNTO IV 40/30/20/10 (D2 Wax)	1.70	6.96	41 ÷ 43	>200.5	60.8	0.040
AFX-645 48/32/12/8 (I-800 Ganex) [18]	1.63	6.83	51 ÷ 64	>200.5	60.8	0.040

Примечания. $H_{50\%}$ — чувствительность к удару, груз 5 кг, H — чувствительность к трению (по методу BAM*), H_e — чувствительность к электростатическому разряду, d_{cr} — критический диаметр детонации.

В [20] изучали скорость частиц в волне взрыва алюминизированного PETN с использованием интерферометра Фабри — Перо. Анализ термодинамики и гидродинамики процесса детонации в зонах реакции и последующего распространения продуктов реакции (волна Тейлора) проводили с использованием модели реагирующего потока. Было получено, что высокие температуры при детонации PETN увеличивают скорость переноса массы, сокращая тем самым временной масштаб реакций с участием алюминия.

2. КОМПОЗИЦИИ NTO/TNT С НИЗКОЙ УЯЗВИМОСТЬЮ

Хорошо известно, что NTO принадлежит к категории нечувствительных ВВ, гораздо менее уязвимых, чем RDX/HMX, с точки зрения риска случайного возбуждения детонации. В ВВС США [19] была проделана большая работа по созданию литевых композиций состава NTO/TNT/Al с малой чувствительностью, несмотря на использование TNT в качестве связующего. Такие композиции получили название TNTO (табл. 9).

С целью преодоления проблемы выпотевания, связанной с низкой температурой плавления D2 Wax, в композиции TNTO IV, известной также под названием AFX-644 (air force explosive), парафин D2 Wax был заменен смесью Indramic-800 и Ganex WP-660 (98.5/1.5).

*BAM — Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung (BAM) = The Federal Institute for Materials Research and Testing = Федеральный институт исследования и тестирования материалов, Берлин, Германия.

Эта композиция получила название AFX-645. Скорости детонации AFX-644 и AFX-645 почти такие же, как у тритонала. При этом чувствительности к удару и трению у AFX-644 и AFX-645 находятся вне пределов измерений по используемым для их определения методикам. Это свидетельствует о том, что композиции с NTO являются наиболее подходящими кандидатами на роль детонирующих веществ с экстремально низкой чувствительностью (EIDS) и могут удовлетворять критериям класса опасности HD 1.6 для нечувствительных боеприпасов по условиям хранения и транспортировки.

3. ADN И VTNEN КАК КОМПОНЕНТЫ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ

3.1. Композиции ADN/Al

В [15] изучены прессованные композиции ADN/Al. Однако скорость детонации таких

Таблица 10

Параметры взрыва прессованных композиций на основе ADN/Al при изменении размера частиц алюминия [15]

Состав	$\bar{\rho}$, г/см ³	\bar{D} , км/с	ρ/ρ_{max} , %
ADN	1.69	4.24	92.2
	1.604	4.19	87.2
ADN/Al (3 мкм) (72/25)	1.794	4.10	90.5
ADN/Al (50 мкм)/ Viton (73/23/3)	1.714	5.03	86.3
ADN/Viton (97/3)	1.752	4.25	95.0
	1.735	4.06	94.0

Таблица 11

Свойства композиций BTNEN/Al (85/15) [31]

a , мкм (диаметр заряда)	ρ , г/см ³	ρ/ρ_{\max} , %	D , км/с	p_{\max} , ГПа (ρ , г/см ³)	Q_v , кДж/кг (ρ , г/см ³)
0	1.870	95.4	8.50	36.4 (1.88)	5 230 (1.89)
0	1.909	97.4	8.66	—	—
150 (20)	1.965	96.1	8.38	—	8 280 (1.94)
15 (20)	1.955	95.6	8.30	35.6 (1.97)	8 280 (1.94)
7 (20)	1.955	95.6	8.28	—	8 600 (1.94)
0.1 (20)	1.910	93.4	8.07	34.1 (1.92)	—
0.1 (20)	1.914	93.6	8.04	—	—
0.1 (40)	1.900	93.0	7.92	—	8 350 (1.90)
0.1 (40)	1.830	89.5	7.66	—	—

Таблица 12

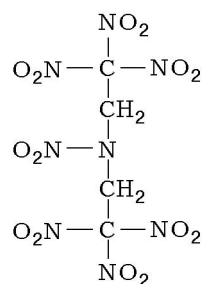
Критическое давление взрыва: сравнение механической чувствительности

ВВ	p_{cr} , ГПа
Гремучая ртуть/азид свинца	$0.20 \pm 0.01/0.38 \pm 0.03$
PETN	0.93 ± 0.03
BTNEN	0.79 ± 0.03
TNT/RDX/HMX	$1.35 \pm 0.03/1.15 \pm 0.03/1.00 \pm 0.03$
BTNEN/Al (0.1 мкм)/(7.0 мкм)	$0.55 \pm 0.02/0.74 \pm 0.02$
HMX/Al (0.1 мкм)/(7.0 мкм)	$0.67 \pm 0.03/0.95 \pm 0.03$

композиций мала, и даже введение наноразмерного алюминия не влияет на скорость детонации соответствующих механических смесей. Положительный эффект в плане повышения скорости детонации был обнаружен при введении в смесь витона (табл. 10, здесь ρ_{\max} — максимальная теоретическая плотность, $\bar{\rho}$ и \bar{D} — средние значения плотности и скорости детонации).

3.2. Композиции PBX с BTNEN

BTNEN:



Молекулярная формула: C₄H₄O₁₄N₈

Молекулярная масса: 388.21

Плотность: 1.96 г/см³

Теплота образования: практически нулевая

Кислородный баланс: +16.5 %

Скорость детонации: 8.5 ÷ 8.66 км/с

Размер и форма частиц: кристаллы игольчатой формы диаметром 15–40 и длиной до 500 мкм

Влияние алюминия и размера его частиц на параметры детонации при использовании композиции на основе BTNEN изучали в [31]. Композицию BTNEN/Al (85/15) готовили путем смешения компонентов в металлическом сосуде в инертной жидкости (гексане) в присутствии фарфоровых шариков. Путем микроскопических исследований было установлено, что частицы алюминия в массе распределены равномерно, а игольчатые кристаллы BTNEN в процессе смешения трансформировались в продолговатые частицы с поперечным размером порядка диаметра исходных игл. Заряды ВВ диаметром 20 и 40 мм были изготов-

лены путем холодного одностороннего прессования. Плотность зарядов достигала 93 % от максимальной теоретической. Авторы [31] обнаружили, что введение алюминия приводит к уменьшению скорости детонации и пикового давления p_{\max} (табл. 11). Они наблюдали, что VTNEN делает композицию даже более чувствительной, чем введение в нее типичных вторичных ВВ, включая PETN. Это может быть следствием положительного кислородного баланса у соединения VTNEN в противоположность отрицательному балансу, характерному для RDX и HMX. Для смеси VTNEN с частицами алюминия размером 0.1 мкм обнаружена еще большая чувствительность (табл. 12). Этот факт объясняется химическим взаимодействием продуктов разложения VTNEN с алюминием в горячих точках [32].

4. ПЛАСТИЧЕСКИЕ ВВ С ПОЛИМЕРНЫМ СВЯЗУЮЩИМ (PBX)

Взрывчатые композиции на основе TNT не способны сохранять конструктивную целостность при нагреве, обусловленном трением при высокоскоростном сверхзвуковом движении ракеты. Это приводит к образованию «горячих точек» и делает систему предрасположенной к быстрому саморазогреву, что может привести к преждевременному срабатыванию — взрыву на траектории. Хранение боеприпасов на основе TNT при высоких температурах, особенно в тропических странах, также имеет ограничения. ВВ с полимерным связующим дают превосходное решение этих проблем. Более того, алюминизированные пластические ВВ (PBX) имеют меньшую рабочую вязкость в сравнении с композициями на основе TNT, что облегчает литье и наполнение боеголовок. Применение алюминия с размером частиц $a = 120 \div 250$ мкм способствует достижению низкой вязкости.

4.1. Композиции PBX с RDX и HMX

Разработка алюминизированных пластических ВВ для подводного применения началась в конце 1950-х гг. Внедрение как прессованных, так и литых пластических ВВ происходило в 1960-е гг. [33]. Первоначально в США были разработаны литые неалюминизированные пластические ВВ с Laminacstyrene в качестве связующего. К этому клас-

Таблица 13
Состав и параметры литевых алюминизированных ВВ на основе RDX с полимерным связующим

ВВ	Состав RDX/Al/НТРВ	ρ , г/см ³	D , км/с
HXA-177 [35]	67/15/18	1.60	7.58
KS-22a [36–38]	67/18/15	1.64	7.40
PBXN-109 [34, 4]	64/20/16	1.65	7.20
HXA-171 [35]	52/30/18	1.67	7.20
HXA-172 [35]	42/40/18	1.72	7.05
HXA-173 [35]	32/50/18	1.77	6.55

су принадлежат PBXN-101 (HMX/Laminacstyrene, 82/18), PBXN-102 (HMX/Al/Laminacstyrene, 59/23/18) и PBXN-104 (HMX/Laminacstyrene, 70/30). Однако они вышли из употребления вследствие ряда недостатков. Полномасштабные тесты выявили их высокую чувствительность и физическую твердость. На смену Laminacstyrene пришли PEG и НТРВ, и далее при выборе связующего для пластического ВВ стали отдавать предпочтение каучуку НТРВ [4]. Свойства алюминизированных ВВ на основе RDX и НТРВ достаточно полно представлены в литературе (табл. 13). Известно использование таких композиций в качестве основного заряда в противокорабельных ракетах «Penguin», ракетах «Hellfire» [34], проникающих бомбах, а также для подводного применения.

В Лаборатории исследования высокоэнергетических материалов (HEMRL), Пуна, Индия, также проводились исследования влияния содержания алюминия на характеристики

Таблица 14
Состав и характеристики алюминизированных пластических ВВ, содержащих RDX [39]

Состав RDX/Al/НТРВ	ρ_{\max} , г/см ³	ρ , г/см ³	D , км/с	$p_{d,calc}$, ГПа
85/0/15	1.586	1.578	7.66	23.8
80/5/15	1.609	1.594	7.53	22.9
75/10/15	1.630	1.610	7.50	22.3
70/15/15	1.670	1.630	7.58	22.4
65/20/15	1.680	1.646	7.26	22.0
60/25/15	1.709	1.680	7.11	21.8

ВВ с НТРВ в качестве связующего [39]. Было установлено, что содержание алюминия 15 % соответствует оптимуму по скорости детонации (табл. 14). Алюминизированные пластиковые ВВ, разработанные в NEMRL, нечувствительны к трению, слабочувствительны к удару ($H_{50\%} = 115 \div 129$) и демонстрируют высокую химическую стабильность (выделение газа менее 1 см^3 за 48 ч при температуре 120°C в вакууме). Прочность на сжатие $1 \div 1.2$ МПа.

В [40] наблюдали уменьшение плотности с 1.63 до 1.62 г/см^3 и скорости детонации с 7580 до 7350 м/с при введении до 15 % 5-микронного алюминия марки Alcan 400 в композицию НХА-123 (RDX/Al/НТРВ, 70/15/15). Изучение стабильности композиции Rowanex 1400 (RDX/Al/НТРВ, 66/22/12) при температуре 60°C проводилось на протяжении 15 месяцев. Через определенные промежутки времени образцы извлекали и анализировали методами аналитической химии, дифференциального термического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, спектроскопии, а также динамического механического анализа. Это позволило оценить срок хранения композиции в нормальных условиях в 20 лет [41, 42].

Алюминизированные композиции с НМХ также хорошо изучены. Как и ожидалось, по сравнению с композициями на основе RDX они обладают большими плотностью и скоростью детонации (табл. 15).

В [46] изучали влияние добавки алюминия в композиции октогена с полиуретановым связующим НМХ/PU (84/16). Алюминий вводили вместо октогена, заменяя им до 30 % октогена. Исследования выявили (табл. 16) снижение бризантности (B) и удельного объема (V_0) выделяемых газов, а также снижение скорости

Таблица 15
Состав и характеристики алюминизированных пластиковых ВВ, содержащих НМХ

ВВ	Состав НМХ/Al/НТРВ	ρ , г/см ³	D , км/с
PBXW-114 [4]	78/10/12	1.72	8.23
PBXI-1[21]	74/10/16	1.67	7.75
PBXI-3 [21]	64/20/16	1.72	7.45
CD-04 [43]	68/20/12	1.73	7.78
KS-33D [38]	80/10/10	1.75	8.00
PBXN-113 [44] PBXII-135 [45]	45/35/20	1.68	6.98

детонации до $\approx 5\%$, тогда как энергия (Q_v) и температура (T_v) взрыва заметно выросли. Сила взрыва (F) достигала максимума при введении 15 % алюминия. Мощность ВВ в терминах произведения $Q_v V_0$, характеризующего теплоту взрыва и бризантность, достигала максимума при добавке 25 % алюминия. Чувствительность к удару ($H_{50\%}$) заметно снизилась с увеличением содержания алюминия. Тем не менее композиции были чувствительны к детонатору № 8. Срок хранения типичной композиции (НМХ/Al/НТРВ, 65/20/15) при 25°C оценивается в 67 лет [47].

Поликапролактон (PCP) также применяется в качестве связующего в литевых пластиковых ВВ. Главное преимущество PCP по сравнению с НТРВ заключается в его совместимости с платификаторами нитроэфирного ряда [48, 49]. Комбинация PCP/ТМЕТН обладает низкой чувствительностью без сни-

Таблица 16
Измеренные и расчетные характеристики алюминизированных пластиковых ВВ на основе НМХ [46]

C_{Al} , %	D , км/с	B , кПа	V_0 , см ³ /г	Q_v , кДж/кг	T_v , К	$H_{50\%}$, см	F , кДж/г	$V_0 Q_v$, 10^4 кДж · л/кг ²
0	7.01	1 073	1 030	3 974	2 974	50	1.145	409
5	—	1 070	972	4 694	3 320	53	1.197	456
10	—	1 059	902	5 500	3 715	56	1.244	496
15	6.82	1 050	831	6 286	4 070	60	1.237	522
20	—	972	760	7 072	4 410	66	1.184	537
25	—	948	689	7 858	4 730	71	1.027	541
30	5.64	868	631	8 031	4 870	74	0.964	506

Таблица 17
Характеристики алюминизированных пластических ВВ с РСР [17] в качестве связующего

ВВ	Состав НМХ/АI/ТМЕТN/РСР	ρ , г/см ³	D , км/с	Q_v^* , %
RX-35-DW	49.5/18/24.84/7.66	1.765	7.33	105
RX-35-EN	43.89/23.13/25.24/7.74	1.787	7.20	117
RX-35-EK	39.49/27.98/24.83/7.70	1.814	7.06	148

Примечание. Q_v^* — относительная по сравнению с тритоналом (ТNT/АI, 80/20) энергия взрыва.

Таблица 18
Состав и характеристики алюминизированных пластических ВВ на основе АР

ВВ	Состав RDX/АP/АI/НТРВ	ρ , г/см ³	D , км/с	d_{cr} , мм
PBXW-115/PBXN-111 [51]	20/43/25/12	1.790	5.97 ÷ 6.20	37.6
DXD-03 [52]		1.78	5.49 ÷ 5.70	—
B 2211/PBXW-115(Aust) [51, 53]		1.79 ÷ 1.81	5.50	65 ÷ 86
FPX-7 [51]	20/40/25/15	1.80	5.50	50
KS-57 [37, 38, 54]	24/40/24/12	1.84	5.62	64
HXA-174 [35]	27/25/30/18	1.70	5.87	—
CD-06 [43]	35/23/32/10	1.81	6.98	—
HXA-178 [35]	42/25/15/18	1.63	6.63	—
PBXN-103 [55] (PBXW-100)	AP/AI/NC/TMETN-TEGDN (40/27/4/25/2.3)	1.89	6.20 ÷ 6.31	27.3
PBXN-105 [55]	RDX/AP/AI/PEG/(BDNPA/F) (7/49.8/25.8/3.13/14.47)	1.90	5.90	60.9
PBXW-123 [50]	AP/AI/TMETN/PCP (44.8/30.2/18.8/6.2)	1.92	5.50	>126

жения энергетики. В литературе описаны также алюминизированные композиции на основе НМХ/РСР [17] (табл. 17).

4.2. Алюминизированные пластические ВВ с перхлоратом аммония

В литературе описаны пластические ВВ на основе АР с НТРВ в качестве связующего (табл. 18), в особенности предназначенные для подводного применения с целью усиления подводной ударной волны и энергии пузыря. Использование PBXW-115 или PBXN-111 дает превосходную альтернативу традиционным алюминизированным взрывчатым композициям. Композиции, по составу эквивалентные PBXW-115, могут встречаться под другими названиями (см. табл. 18). Различия в заявляемых характеристиках композиций, особен-

но по критическому диаметру детонации, вероятно, обусловлены различием свойств использованного в их составе RDX, полученного из разных источников. В литературе упоминается также использование в качестве связующего NC и PEG. Композиции с PEG характеризуются высоким значением критического диаметра детонации. Для типичной композиции на основе РСР (известной под названием PBXW-123) критический диаметр более 126 мм, и она инициируется ударной волной 8 ГПа, в то время как PBXN-103 — волной в 5.9 ГПа [50].

Замена RDX на АР дает заметное увеличение полной энергии Q_{Σ} , в то время как энергия детонации Q_d уменьшается [4] (табл. 19).

Представляет интерес исследование пластических ВВ, содержащих НМХ и АР. В [56] изучали реакционное поведение алюминия в композиции с НМХ В3103

Таблица 19
Влияние Al и AP на полную энергию и энергию детонации [4]

ВВ	Состав	Q_{Σ} , кал/г	Q_d , кал/г
RDX	—	1204	1141
PBXW-108	RDX/НТРВ (85/15)	1238	883
PBXW-109	RDX/Al/НТРВ (65/20/15)	1885	796
PBXW-115	RDX/AP/Al/НТРВ (20/43/25/12)	2025	351

(51/19/30, НМХ/Al/связующее) и в бризантной композиции В3100 (42/9/19/30, НМХ/AP/Al/связующее) с AP. В качестве базовой выбрана композиция В3312 (51/19/30, НМХ/LiF/связующее), в которой алюминий был заменен инертным LiF, имеющим близкие к нему параметры механического импеданса. Практически равные скорости детонации композиций В3103 (7760 м/с) и В3212 (7790 м/с) свидетельствуют о том, что влияние Al аналогично LiF, т. е. алюминий не окисляется в плоскости Чепмена — Жуге. Замена НМХ на AP приводит к улучшению баллистических характеристик, вероятно, вследствие дополнительного количества кислорода, выделяемого

перхлоратом аммония и обеспечивающего более высокую степень окисления.

Некоторые алюминизированные пластические ВВ имеют практически те же характеристики, что и ВВ на основе TNT. При этом они являются потенциальными кандидатами на использование в широком классе боеприпасов пониженного риска (табл. 20).

4.3. Алюминизированные пластические ВВ на основе НТО

Исчерпывающий обзор ВВ, основанных на НТО, AP и Al, дан в [57]. Разработанные в Государственной корпорации по производству порохов и взрывчатых веществ (SNPE), Франция, алюминизированные пластические ВВ на основе НТО с добавлением AP, получившие название «состав В», соответствуют композициям на основе PBXW, разрабатываемым в США (табл. 21).

Композиция PBXW-126 (плотность 1.80 г/см³, скорость детонации 6.47 км/с, давление детонации 16.0 ГПа [64]) признана лучшей среди составов PBXW. Пиковое давление, создаваемое PBXW-126, в 1.29 раза превышает соответствующее давление для TNT и в 1.22 раза для PBXN-109 [64]. Экспериментально измеренный импульс PBXW-126 на 6 % выше импульса TNT и на 25 % выше

Таблица 20
Эквивалентность по области применения и по характеристикам традиционных ВВ на основе TNT и ВВ с полимерным связующим [4]

Тип и назначение ВВ	Применение	Эквивалентные составы	
		обычные	с полимерным связующим
Общего назначения	Наполнение бомб	Н-6 Тритонал	PBXN-109 (RDX/Al/связующее, 64/20/16) PBXC-117 (RDX/Al/связующее, 71/17/12)
Высокой бризантности	Кумулятивные заряды, дробление	Октол	PBXN-110 (НМХ/связующее, 88/12)
Бризантное	Кумулятивные заряды, дробление	Состав В Циклотолы	PBXN-106 (RDX/связующее, 75/25) PBXN-107 (RDX/связующее, 86/14) PBXW-108 (RDX/связующее, 85/15) AFX-108 (RDX/связующее, 82/18)
Метание металлических осколков	Кумулятивные заряды	Тетрил СН-6	PBXN-5 (НМХ/связующее, 95/05) PBXN-6 (RDX/связующее, 95/05) PBXN-7 (RDX/Al/связующее, 60/35/05)
Подводная ударная волна, создание пузыря	Торпеды, мины: устройства противодействия	Н-6 НВХ-1	PBXN-103 (AP/Al/связующее, 40/27/33) PBXN-105 (RDX/AP/Al/связующее, 7.0/49.8/25.8/17.4) PBXW-115 (RDX/AP/Al/связующее, 20/43/25/12)

Таблица 21

Пластические ВВ серии В (Франция) и композиции на основе PBXW (США)

ВВ	NTO	RDX	HMX	AP	Al	Связующее
PBXW-121 [58]	63	10	—	—	15	12 (НТРВ)
PBXW-122 [59, 60]	47	5	—	20	15	13 (НТРВ)
PBXW-124 [60]	27	20	—	20	20	13 (НТРВ)
PBXW-125 [60]	22	20	—	20	26	12 (НТРВ)
PBXW-126 [60, 61]	22	20	—	20	26	12 (PU)
В 2245 [62]	8	12	—	43	25	12 (НТРВ)
В 2233 [63]	31	—	6	28	10	15 (НТРВ)
PBXW-125 мод. 2 [17]	10	25	—	20	33	12 (НТРВ)

импульса PBXN-109. PBXW-126 в свободном объеме имеет критический диаметр взрыва менее 76 мм, что говорит о его сравнительно слабой чувствительности. Критический диаметр детонации PBXW-124 и PBXW-122 — $76 \div 109$ и 178 мм соответственно — удовлетворяет критериям нечувствительности. Вариант композиции PBXW-125, известный под названием «PBXW-125 мод. 2», считается более эффективным для боеголовок, используемых против прочных целей [17].

4.4. Алюминизированные пластические ВВ, основанные на GAP и PolyNIMMO

Результаты исследований алюминизированных пластических ВВ с GAP в качестве связующего приведены в [7] (табл. 22). GAP был пластифицирован смесью BDNPA/F (в пропорции 1/1) и отвержден с помощью Desmodur N-100. Улучшенный кислородный баланс способствует завершению реакций с алюминием. Было обнаружено, что для таких композиций импульс и пиковое давление практически не меняются при изменении содержания алюминия от 15 до 33 %. Дальнейшее увеличение содержания алюминия приводит к уменьшению пикового давления. Энергия газового пузыря достигает максимума при добавлении 40 % алюминия.

Введение AP (см., например, GHX 76 и GHX 82 в табл. 22) приводит к увеличению энергии пузыря, тогда как пиковое давление остается неизменным. Размер частиц алюминия ($5 \div 150$ мкм) не повлиял на энергию пузыря, несмотря на ее увеличение с ростом содержания алюминия. Давление и импульс так-

же не изменялись при увеличении содержания алюминия вплоть до 30 %. В [65] установлено, что замена крупного AP на мелкий в композиции на основе RDX/GAP приводит к увеличению скорости детонации, а также к снижению

Таблица 22

Состав алюминизированных пластических ВВ со связующим GAP (с добавлением и без добавления AP) [7]

ВВ	RDX	Al	GAP	AP
GHX 86	82	—	18	—
GHX 78	67	15	18	—
GHX 83	62	20	18	—
GHX 84	57	25	18	—
GHX 85	52	30	18	—
GHX 87	42	40	18	—
GHX 89	27	50	18	—
GHX 99	47	30*	23	—
GHX 100	47	30**	23	—
GHX 101	47	30***	23	—
GHX 76	42	15	18	25
GHX 80	37	20	18	25
GHX 81	32	25	18	25
GHX 82	27	30	18	25

Примечания. * Удельная поверхность 0.134 м²/г, средний размер частиц 150 мкм; ** удельная поверхность 0.229 м²/г, средний размер частиц 50 мкм; *** удельная поверхность 1.144 м²/г, средний размер частиц 5 мкм.

Таблица 23

Влияние размера частиц AP на характеристики алюминизированных ВВ с GAP в качестве связующего [65]

ВВ	RDX	GAP	Al 5 мкм	AP		ρ , г/см ³	D, км/с	Чувствительность	
				200 мкм	5 мкм			к удару, Н·м	к трению, Н
GHX 82	27	18	30	25	—	1.91	6.81	2.0 ÷ 3.0	20 ÷ 24
GHX 116	27	18	25	30	—	1.88	6.75	3.0	24
GHX 117	27	18	25	15	15	1.87	7.08	4.0	30

Таблица 24

Характеристики композиций с CL-20 для подводных взрывов [35]

ВВ	CL-20	Al	AP	GAP	ρ , г/см ³	D, км/с
GHX-106	27	30	25	18	1.95	6.87
GHX-107	22	35	25	18	1.96	6.58

чувствительности к удару и трению (табл. 23).

В настоящее время в композициях для подводных взрывов, основанных на Al и AP, в качестве взрывчатого компонента применяют также CL-20. Введение CL-20 дает заметное увеличение плотности композиции и скорости детонации по сравнению с композициями GAP/RDX/AP/Al вследствие более высокой плотности и скорости детонации, а также улучшенного кислородного баланса самого CL-20 как индивидуального вещества (табл. 24).

Алюминизированные пластические ВВ на основе комбинации NTO и HMX, включающие 10 % полимера PolyNIMMO и 10 % энергетического пластификатора К-10, были разработаны в Великобритании и получили обозначение CPX. Среди описанных композиций CPX наибольшую скорость детонации имеет CPX 459 (табл. 25).

4.5. Термобарические пластические ВВ

Термобарические составы предназначены для военного применения с целью создания высоких давлений в закрытых объемах, таких как пещеры и бункеры. В 2003 г. две организации США (Центр военно-морского надводного оружия, Отделение в Индиане (Naval Surface Warfare Center Indian Head Division — NSWC IHD) и фирма «Talley Defense Systems» (TDS)) совместно разработали твердые термобарические составы с содержанием алюминия от среднего до высокого, предназначенные для использования в легких боеголовках для переносных гранатометов системы M72 LAW [66] с боеголовками проникающего действия для поражения в укрытиях. Различные составы, разработанные в NSWC IHD на основе PBXII-135, представлены в табл. 26.

В [67] описаны термобарические композиции с использованием парафина НТРВ или GAP в качестве связующих. Целью исследования было определение сравнительных термобарических характеристик для выбранных композиций при испытаниях в замкнутом объеме. Отмечено, что наивысший импульс и среднее пиковое повышение давления достигнуты при использовании GAP. Обнаружено,

Таблица 25

Характеристики составов CPX

ВВ	NTO/HMX/Al	PolyNIMMO	К-10	ρ , г/см ³	D, км/с
CPX 450	40/20/20	10	10	—	—
CPX 455	40/20/20	10	10	—	—
CPX 458	30/30/20	10	10	1.85	7.68
CPX 459	20/40/20	10	10	1.86	7.76
CPX 460	27.5/27.5/25	10	10	1.88	6.42

Таблица 26
Составы ВВ, разработанных в NSWC IHD

ВВ	Состав	ρ , г/см ³
PBXIH-135	HMX/Al/НТРВ	1.68
PBXIH-135EB	HMX/Al/PCP-TMETN	1.79
PBXIH-136	RDX/AP/Al/PCP-TMETN	2.03
HAS-4	HMX/Al/НТРВ	1.65
HAS-4 EB	HMX/Al/PCP-TMETN	1.73
PBXIH-18	HMX/Al/Нytemp/DOA	1.92
PBXIH-18 мод. 1	HMX/Al/Нytemp/DOA	1.77
PBXIH-18 мод. 2	HMX/Al/Нytemp/DOA	1.84
Talley Mix 5672	Al/Zr/IPN/Ethyl Cellulose (32/40/26.75/1.25)	2.21

что композиции на основе Ti/НТРВ превосходят соответствующие композиции с алюминием по среднему пиковому давлению и импульсу. Также исследовались композиции с GAP и подходящими энергетическими пластификаторами, для которых достигнут средний импульс до 975 кПа·мс. В [67] описана гелеобразная термобарическая композиция, включающая 60 ÷ 70 % Mg/Al/Ti/Zr в качестве горючего и 20 ÷ 30 % энергетических компонентов — жидкого нитрометана (NM) и изопропилнитрата (IPN). Композиции с NM демонстрируют более высокий импульс по сравнению с композициями на основе IPN. Описана также система окислители/энергетический компонент типа AN/AP/HMX. Все перечисленные компоненты совместимы в любых сочетаниях. Наилучшие результаты получены для композиции NM/Al/HMX (30/30/40), для которой среднее значение пикового повышения давления составило 0.5 МПа и импульса — 802 кПа·мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что реакция алюминия с продуктами детонации до сих пор еще не до конца изучена, общепризнано, что реагирование алюминия происходит за более продолжительное время по сравнению с TNT, RDX или HMX. Исследование процессов детонации бризантных алюминизированных составов [33] показало, что характер влияния алюминия на взрывные характеристики композиций зависит главным образом от природы ВВ и размера

частиц алюминия. Алюминий, реагирующий на звуковой поверхности (Чепмена — Жуге), имеет возможность поддерживать детонационный фронт. Положительный эффект наблюдается для бризантных ВВ как с положительным, так и с отрицательным кислородным балансом, при условии высокого содержания водорода и низкого содержания углерода в молекуле [18]. Можно ожидать, что мелкие частицы алюминия быстрее расходуются в зоне реакций с участием элементов С, Н, N, O, чем более крупные частицы. Тем не менее в случае наноразмерного алюминия ощутимое влияние размера может быть обнаружено, только если время взаимодействия алюминия с продуктами детонации достаточно мало. Неоднократно были получены противоречивые результаты. Было замечено, что уменьшение размеров частиц алюминия до субмикронных и нанометровых масштабов сопровождается увеличением доли оксидной пленки Al₂O₃, покрывающей частицы, что в некоторых случаях может приводить к снижению энергетической эффективности использования алюминия. Добавление перхлората аммония в алюминизированные пластиковые ВВ обеспечивает получение большей энергии пузыря, чем в случае НВХ-3. Повышенное содержание кислорода в перхлорате аммония обуславливает более высокую степень влияния реакции окисления на увеличение энергетических характеристик подводного или воздушно-го взрыва.

С использованием полимерных связующих созданы литевые композиции с содержанием твердых частиц до 87 ÷ 88 % и плотностью до 97 % от максимальной теоретической. Появление веществ с экстремально низкой чувствительностью открывает новые пути в исследованиях ВВ с полимерными связующими и для достижения поставленной цели — разработки нечувствительных боеприпасов класса опасности HD 1.6. В США (NSWC IHD) предложен ряд боеприпасов с экстремально низкой способностью к детонации. В качестве компонента алюминизированных ВВ с пониженной чувствительностью был исследован «улучшенный гексоген» марки I-RDX. Композиция PBXIH-135 (HMX/Al/НТРВ) является одной из лучших в категории термобарических ВВ (создающих высокие температуры и давления), разработанных для боеголовок. Эти нечувствительные боеприпасы могут быть использованы для разрушения тоннелей, пещер, бункеров, а так-

же на твердых поверхностях. Для сверхзвуковых ракет и снаряжения бомб общего назначения (500 и 2000 фунтов) требуется использовать нечувствительные боеприпасы. В целом все военные службы предпринимают шаги по замене существующих зарядов с TNT нечувствительными ВВ, главным образом ВВ с полимерными связующими с улучшенными механическими свойствами, повышенной долей твердых частиц и убийной силой. Предпринимаются усилия, направленные на разработку взрывчатых композиций, основанных на нечувствительных ВВ, подобных FOX-7, которые могут найти применение в алюминизированных композициях. В NEMRL (Индия) также ведутся исследования в этом направлении. Выполнена оценка ряда алюминизированных пластических ВВ, для некоторых выбранных составов проведены подводные испытания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Roth G.** Performance of Explosives. German Patent 173327. 1900.
2. **Gharia J. S., Athawale B. K., Sathye P. D.** HE composition for Enhanced Blast Effect // Proc. 1st Symp. on Warhead Technology, 3-4 March 1983, TBRL, Chandigarh. P. 152-161.
3. **Maranda A.** Research on the process of detonation explosive of mixtures of the oxidiser fuel type containing Al powder // Propell., Explos. Pyrotechn. 1990. V. 15. P. 161-165.
4. **Anderson E.** Tactical Missile Warhead / J. Carleone (Ed.). Ch. 2: Explosive. Washington: American Inst. of Aeronautic and Astronautic Inc., 1993. V. 155.
5. **Gharia J. S., Athawale B. K., Visal S. R., Phadtare V. V.** Effect of Al particle size and percentage on blast composition // Proc. 1st Symp. on Warhead Technology, 3-4 March 1983, TBRL, Chandigarh. P. 144-151.
6. **Stromose E., Eriksen S. W.** Performance of high explosives in underwater application. Pt 2: Aluminised explosives // Propell., Explos. Pyrotechn. 1990. V. 15. P. 52-53.
7. **Keicher T., Happ A., Kretschmer A.** Influence of Al/ammonium perchlorate on the performance of underwater explosives // Propell., Explos. Pyrotechn. 1999. V. 24. P. 140-143.
8. **Wise L. S.** Effect of Al on the rate of detonation of TNT // Picatinny Arsenal Technical Report-1550. Dover, New Jersey, 1945.
9. **Tomlinson W.R., Jr.** Development of new high explosive filler for AP shot // Picatinny Arsenal Technical Report-1290. Dover, New Jersey, 1943.
10. **Kennedy W. B., Arentzen R. F., Tait C. W.** Survey of the performance of TNT/Al on the basis of air-blast pressure and impulse // OSRD 649, Division 2. Monthly Report N AES-6 (25 Jan., 1945).
11. **Akhavan J.** The Chemistry of Explosives. RSC Paperbacks. Cambridge, 2004.
12. **Frost D. L., Goroshin S., Ripley R., Fan Zhang.** Effect of scale on the blast wave from a metallized explosive // Proc. 13th Intern. Detonation Symp. Norfolk, 2006.
13. **Volk F., Barthelt H., Schedlbauer F., Wagner J.** Detonation products of insensitive cast high explosives // Proc. 8th Symp. (Intern.) on Detonation. Albuquerque, 1985. P. 577-586.
14. **Baudin G., Bergues.** A Reaction model for aluminised PBX applied to underwater explosion calculations // Proc. 10th Intern. Detonation Symp. Boston, 12-16 July 1993. P. 646-655.
15. **Miller P. J., Bedford C. D., Davis J. J.** Effect of metal particle size on the detonation properties of various metallised explosives // Proc. 11th Detonation (Intern.) Symp. Snowmass, Colorado, USA, Aug. 31-Sept. 4 1998. P. 214-220.
16. **Encyclopedia of Explosives and Related Items** // Picatinny Arsenal Technical Report-2700. Dover, New Jersey, 1983. V. 9. P. T-396.
17. **Simpson R. L., Swansiger R. W., Hoffman D. M., James E., Souers Hard P. C., Struck S., Carswell S., Mendicki P. J.** Target penetrator explosive development: optimization of fragment, blast and survivability properties of explosives for hard target applications // 47th Annu. Bomb and Warhead Technical Meeting, Los Alamos, May 6-8 1997.
18. **Corley J. D.** Fuzed insensitive general purpose bomb containing AFX-645 // Proc. Intern. Symp. on Energetic Materials Technology, Meeting N 680, Phoenix, Arizona, USA, 24-27 Sept. 1995. American Defence Preparedness Association. P. 98-103.
19. **Costain T. S., Motto R. V.** The sensitivity, performance and material properties of some high explosives formulations // Picatinny Arsenal Technical Report-4587. Dover, New Jersey, 1973. P. 50-51.
20. **Tao W. C., Tarver C. M., Kury J. W., Lee C. G., Ornellas D. L.** Understanding composite explosive energetics: IV. Reaction flow modeling of Al reaction kinetics in PETN and TNT using normalized product equation of state // Proc. 10th Intern. Detonation Symp., Boston, 12-16 July 1993. P. 628-636.
21. **Brosseau P.** Nanometric Al in explosives // Propell., Explos. Pyrotechn. 2002. V. 27. P. 300-306.
22. **Roslund L. A., Coleburn N. L.** Hydrodynamic behavior of HBX-1 and equation of state of the detonation products below the Chapman — Jouguet State // Naval Ordnance Lab., White OAK. TR 70-133. Maryland. Nov. 6 1970.
23. **Roslund L. A., Coleburn N. L.** Hydrodynamic behavior of HBX-1 and equation of state of

- the detonation products below the Chapman — Jouguet State // Proc. 5th Symp. (Intern.) on Detonation, ACR. 1-84. Pasadena, Aug. 18–21 1970. P. 523–532.
24. **Clairmont A. R.** PBX's in Large Navy Munitions Program. V. 7: Cylinder Expansion Testing // Naval Surface Warfare Center. TR 80-43. Maryland. Nov. 1988.
 25. **Coleburn N. L., Liddiard T.** Hugoniot equation of state of several unreacted explosives // J. Chem. Phys. 1966. V. 44, N 5. P. 1929–1936.
 26. **Hall T. N., Holden J. R.** Navy explosives handbook, explosion effects and properties. Pt III: Properties of explosives and explosive compositions // Naval Surface Warfare Center. MP 88-116. Dahegren, India. Oct. 2000.
 27. **Anderson C. J., Katsabanis P.** Evaluation of heat of detonation, final report // Mining Resource Engineering Limited, Kingston, Ontario. Prepared for Defence Research Establishment Valcartier, April 2000.
 28. **Anderson C. J., Katsabanis P.** Heat of detonation: Pt II; Final report // Mining Resource Engineering Limited, Kingston, Ontario. Prepared for Defence Research Establishment Valcartier, May 2001.
 29. **Dorsett H. P., Brosseau P., Cliff M. D.** The influence of ultrafine aluminium upon explosives detonation // 28th Intern. Pyrotechnic Seminar. Adelaide, South Australia, 2001. P. 239–244.
 30. **Engineering design handbook: explosives series properties of military interest** // Army Material Command. Pamphlet AMCP 706-177, Washington D. C., Jan. 1971. P. 193.
 31. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., Baudin G.** Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurement) // Proc. 11th Intern. Detonation Symp. Snowmass, Colorado, USA, Aug. 31–Sept. 4 1998. P. 979–988.
 32. **Гогуля М. Ф., Махов М. Н., Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Архипов В. И., Щетинин А. Г.** Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 82–95.
 33. **Stosz M. J.** Development of new explosives for the US Navy // 13th Intern. Annu. Conf. of ICT. 1982. P. 257–275.
 34. **Lochert I. J., Dexter R. M., Hamshere B. L.** Evaluation of Australian RDX in PBXN-109 // DSTO-TN-0440. Edinburgh, South Australia, 2002.
 35. **Keicher T., Langer G., Rohe T., Kretschmer A., Ehrhardt W., Kolle S., Happ A.** Herstellung und Charakterisierung von Unterwasserprengstiffen // Proc. 30th Intern. Annu. Conf. of ICT. 1999. P. 121-1–121-12.
 36. **Wanninger P.** Empfindlichkeit von Explosivstoffen und Ladungen gegen Beschuss // Proc. 22nd Intern. Annu. Conf. of ICT. 1991. P. 5-1–5-23.
 37. **Kleinschmidt E.** Empfindliche Explosivstoffe — eine Gefahr für die Umwelt? // Proc. 24th Intern. Annu. Conf. of ICT. 1993. P. 26-1–26-24.
 38. **Arnold W., Muthig H.** KS22a, the insensitive high for hard target defeat applications // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symp. Orlando, 2003.
 39. **Prakash Vinay (Mrs), Phadke V. K., Sinha R. K., Singh H.** Influence of Al on performance of HTPB based aluminised PBXs // Science Defense J. 2004. V. 54, N 4. P. 475–482.
 40. **Volk F., Schedlbauer F.** Detonation products of less sensitive high explosives formed under different pressures of argon and in vacuum // Proc. 9th Symp. (Intern.) Detonation, Portland, Oregon, Aug. 28–Sept. 1 1989. P. 962–964.
 41. **Jemmett P. A., Davies N.** Mechanical and chemical characterisation of a polymer bonded explosive during aging // Proc. 31st Intern. Pyrotechnics Seminar. Fort Collins, Colorado, 2004. P. 679–685.
 42. **Cheese P., Barnes P., Sharp M., Hollands R., Murray I., Jemmett P. A., Davies N.** Studies on the effect of aging on a UK range of polymer bonded explosives // Insensitive Munitions and Energetic Materials Symp., Event N 5550, Hilston, 2004.
 43. **Huang Hui, Dong Haishan.** Studies on low vulnerable high explosives // Theory and Practice Energetic Materials: Proc. 4th Intern. Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics / Chen Lang, Feng Changgen (Eds.). Sha oxing, China, 2001. P. 12–18.
 44. **Poehlein S. K., Burch D., Johnson R., Beyard M., Larson S.** Requalification of demilitarized HMX for military use // Proc. 36th Intern. Annu. Conf. of ICT. 2005. P. 8-1–8-13.
 45. **McGregor T. C., Clark K. A., Beyard M., Sandagger K.** Requalification of demilitarized HMX for DOD/DOE applications // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symp. Bristol, 2006.
 46. **Radwan M. A.** Explosive characteristics of aluminised plastic bonded explosives based on octogen and polyurethane binder // 32nd Intern. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, FRG. 2001. P. 44-1–44-9.
 47. **Lee J.-S., Hsu C.-K.** Thermal properties and shelf life of HMX-HTPB based plastic-bonded explosives // Thermochim. Acta. 2002. V. 393. P. 153–156.
 48. **Wen-Hwa Hwu, Chin-Sheng Cheng, Chen-Chia Huang.** Study on thermal decomposition of PCP/AP/RDX propellants // Proc. 24th Intern. Annu. Conf. of ICT. 1993. P. 80-1–80-14.
 49. **Min B. S., Baek G., Ko S. W.** Characterization of polyether-type GAP and PEG blend matrices prepared with varying ratios of different cu-

- ratives // J. Ind. Eng. Chem. 2007. V. 13, N 3. P. 373–379.
50. **Wilson W. H., Forbes J. W., Gustavson P. K., Sutherland G. T.** Experimental study of detonation in PBXW-123, a large failure-diameter, non-ideal explosive // Proc. 10th Intern. Detonation Symp. Boston, 12–16 July 1993. P. 63–68.
51. **Sjoberg P., Hytti H., Strandberg R., Krariniemi A., Muilu M.** PBX with insensitive RDX, a new EIDS substance for underwater use // Proc. 33rd Intern. Annu. Conf. of ICT. 2002. P. 16-1–161-12.
52. **Lec J. W., Lee J., Kuk J. H., Song S.-Y., Choi K. Y.** Air blast measurement of an aluminised explosive // Minutes of 25th Explosive Safety Seminar. Anaheim, 1992. V. I. P. 429–451.
53. **Mala J., Groux J., Bigot Y.** Detonation properties of insensitive cast PBX's at low temperature // Proc. 11th Intern. Detonation Symp., Snowmass, Colorado, USA, Aug. 31–Sept. 4 1998. P. 384–390.
54. **Held M.** Steady state detonation velocity D_∞ of infinite radius derived from small samples // Propell., Explos. Pyrotechn. 1992. V. 17, N 6. P. 275–277.
55. **Stosz M. J.** Advanced development of insensitive PBX's for less vulnerable munitions // Minutes of 20th Explosive Safety Seminar. Norfolk, 1982. P. 1165–1191.
56. **Baudin G., Bergues. A** Reaction model for aluminised PBX applied to underwater explosion calculations // Proc. 10th Intern. Detonation Symp., Boston, 12–16 July 1993. P. 646–655.
57. **Smith M. W., Cliff M. D.** NTO-based explosive formulations: A technology review // DSTO-TR-0796. Salisbury, South Australia, 1999.
58. **Senn M. R., Newman K. E., Wise T.E., Jones W. S.** Chemicals and processing assessment of candidate explosives for the advanced bomb family // IHTR-1370, Naval Ordnance Station, Indian Head, USA, 1990.
59. **Spear R. L., Dagley I. J., Whitty P.** Options for future RAAF GP bombs meeting IM and/or HD 1.6 Criteria // DSTO-CIC-0001, 1994. Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne, Australia.
60. **Wilson L. T., Reedal D. R., Simpson B. M.** Comparison of PBXW-126 and PBXC-129 for use in large fragmenting warheads // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symp., Event N 854, Florida, USA, 6–9 October 1997. National Defense Industrial Association.
61. **Murphy M. J., Simpson R. L., Urtiew P. A., Soures P. C., Garcia F., Garza R. G.** Reactive flow model development for PBXW-126 using modern nonlinear optimization methods // Conf. of the Amer. Phys. Soc. «Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter». Washington, USA, 13–18 Aug. 1995 / S. C. Schmidt, W. C. Tao (Eds). New York: AIP Press, 1995. P. 417–420. (American Inst. of Phys. Conference Proc.; V. 370).
62. **Be'cuwe A., Delclos A., Isler J.** EIDS high explosives for 1.6 munitions // Proc. Intern. Symp. on Energetic Materials Technology, Meeting N 680, Phoenix, Arizona, USA, 24–27 Sept. 1995. American Defence Preparedness Association. P. 119–124.
63. **Nouguez B.** Dual Formulation Warheads: A mature technology // Insensitive Munitions Technology Symp., Meeting N 471, Virginia, USA, 6–9 June 1994. American Defence Preparedness Association. P. 280–287.
64. **Leathy J.** PBXW-126, an insensitive explosive for general purpose bombs // Ibid. P. 517–523.
65. **Langer G., Keicher T., Ehrhardt W., Rohe T., Happ A., Kretschmer A., Armin K.** The influence of particle size of AP and Al on the performances of underwater explosives // Proc. 34th Intern. Annu. Conf. of ICT. 2003. P. 12-1–12-16.
66. **Johnson N., Carpenter P., Newman K., Jones S., Schlegel E., Gill R., Elstrodt D., Brindle J., Tiffany M., BeBolt J.** Evaluation of explosive candidates for a thermobaric M72 law shoulder launched weapon // NDIA 39th Annu. Gun and Ammunition/Missiles and Rockets Conf., 2004.
67. **Hall S., Knowlton G. D.** Development, characterisation and testing of high blast thermobaric compositions // Proc. 31st Intern. Pyrotechn. Seminar. Fort Collins, Colorado, 2004. P. 663–678.

*Поступила в редакцию 3/X 2007 г.,
в окончательном варианте — 25/I 2008 г.*