

УДК 536.46

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ БОЕПРИПАСОВ

M. Anniyappan, M. B. Talawar, R. K. Sinha, K. P. S. Murthy

Лаборатория исследований высокоэнергетических материалов (HEMRL), Пуна 411021, Индия
anniorganic@rediffmail.com

Малочувствительные боеприпасы — химически стабильные боеприпасы, способные противостоять термическим, механическим или электрическим воздействиям во время хранения и транспортировки и при этом способные производить взрыв для поражения соответствующих целей. Во всем мире разработаны обширные программы по их разработке и внедрению. Использование малочувствительных энергетических материалов значительно улучшает защиту современных ядерных боеголовок и повышает живучесть обычных боеприпасов в полевых условиях. Основой получения малочувствительных боеприпасов является использование в качестве исходных уже имеющихся малочувствительных энергетических материалов, а также синтез новых, менее чувствительных кристаллических материалов либо улучшение физических свойств существующих энергетических материалов. В обзоре обсуждаются некоторые перспективные малочувствительные энергетические материалы и пластификаторы, играющие значительную роль в разработке футуристических композиций для малочувствительных боеприпасов. Кратко излагается работа, проделанная в последнее время во всем мире, включая Индию, по созданию современных энергетических материалов и малочувствительных энергетических составов на их основе.

Ключевые слова: малочувствительные энергетические материалы, связующие, пластификаторы, составы, малочувствительные боеприпасы.

DOI 10.15372/FGV20200501

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки будущих систем вооружений необходимо использовать взрывчатые составы и топлива, обладающие повышенной производительностью и сниженной уязвимостью при хранении и транспортировке. Малочувствительные боеприпасы (МБ) должны надежно выполнять такие эксплуатационные задачи, как срабатывание только по требованию и минимальное случайное инициирование внешними воздействиями. Кроме того, использование МБ имеет ряд преимуществ с точки зрения экономики и логистики — складирования, хранения, транспортировки. Можно, например, обеспечить хранение боеприпасов на небольших площадях за счет расположения складов ближе друг к другу и при этом исключить риск массового взрыва.

Информационный аналитический центр НАТО по безопасности боеприпасов (MSIAC), занимающийся вопросами МБ, обнаружил в

1998 г. документ STANAG 4439, в котором излагались общие намерения в отношении МБ, и к настоящему времени он ратифицирован более чем 15 странами. Помимо STANAG, каждая страна проводит свою собственную национальную политику в области МБ. Принципы проведения квалификации и испытания малочувствительных боеприпасов (MURAT), позволяющие осуществлять политику и требования, предусмотренные в STANAG 4439, изложены в «Alliance Ordnance Publication» (табл. 1) [1, 2].

Хотя подходы к созданию МБ включают в себя и конструкцию снарядов, и соответствующую их упаковку, и создание метательных устройств, главным остается разработка как можно менее чувствительных энергетических материалов для взрывчатых и метательных составов.

В имеющихся публикациях содержится очень мало подробностей по составу композиций, созданных из малочувствительных материалов [3–7]. Цель настоящей работы — дать обзор существующих малочувствительных твердых высокоэнергетических материа-

Таблица 1

Базовые тесты для квалификации малочувствительных боеприпасов^{a,b}

Возможные угрозы для боеприпасов	Опыты	Условия опытов (технические требования)	Поведение боеприпасов (тип отклика)*
Пожар на складе, в магазине, транспортном средстве	Медленное нагревание (SCO-test)	Нагрев при температуре 3.3 °C/ч до тех пор, пока не произойдет событие (STANAG 4382)	Детонация (тип I)
Атака осколками боеприпасов	Воздействие осколками	Атака высокоскоростными осколками (MIL-Std-2105B)	Частичная детонация (тип II)
Атака противника или террориста	Воздействие пульей	Атака одиночной бронебойной пулей 0.50 (STANAG 4241)	Взрыв (тип III)
Взрыв на складе, в магазине, транспортном средстве	Индукцированная реакция	Одиночный боеприпас, детонирующий в обычной упаковке (STANAG 4396)	Горение (тип IV)
Пожар на складе, в магазине, транспортном средстве	Горение топлива Fast Cook-Off (FCO)	Воздействие пламени жидкого топлива до тех пор, пока не произойдет событие (STANAG 4240)	Горение (тип V)
Авария или небрежное обращение	Испытание безопасности методом падающего груза	Воздействие сильного удара (STANAG 4375)	

*Условие тестирования МБ: нет отклика сильнее, чем горение (тип V). ^aSTANAG 4439, издание X, «Условия введения и оценки малочувствительных боеприпасов», март 2010 г. ^bАОР-39, издание 3, «Руководство по оценке и разработке малочувствительных боеприпасов», март 2010 г.

лов, энергетических полимерных связующих и пластификаторов и выявить их роль в составах для МБ, используя при этом самые последние публикации по рассматриваемой проблеме. В качестве примера приведен индийский сценарий по разработке этих ингредиентов и изучения их полезности в МБ-композициях.

1. ТВЕРДЫЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

В поисках новых и более безопасных в обращении высокоэнергетических взрывчатых веществ (ВВ) был выявлен и подробно изучен ряд малочувствительных молекул. На рис. 1 представлены малочувствительные ВВ и компоненты малочувствительных композиций. Энергетические свойства молекул этих веществ, за исключением RDX и CL-20, показали превосходные рабочие характеристики. В то же время представленные соединения демонстрируют низкую чувствительность (табл. 2).

Малочувствительные и достаточно эффективные МБ-композиции на основе CL-20 и RS-RDX могут быть реализованы путем их введения в составы с малочувствительными энергетическими связующими и пластификаторами. Полученные смеси называют полимерно-связанными (или пластическими) ВВ, в которых энергетический чувствительный компонент диспергирован в полимерной матрице. Скорость детонации (V_D) выбранных высокоэнергетических материалов показана на рис. 2.

1.1. 3-нитро-1,2,4-триазол-5-один (НТО)

НТО — потенциальный кандидат для малочувствительных зарядов, используемых в бомбах общего назначения, подводных взрывных устройствах, кумулятивных зарядах (проникающих) и боеприпасах среднего калибра. Впервые НТО был получен в 1905 г. [7], однако интерес к нему появился в середине 1980-х го-

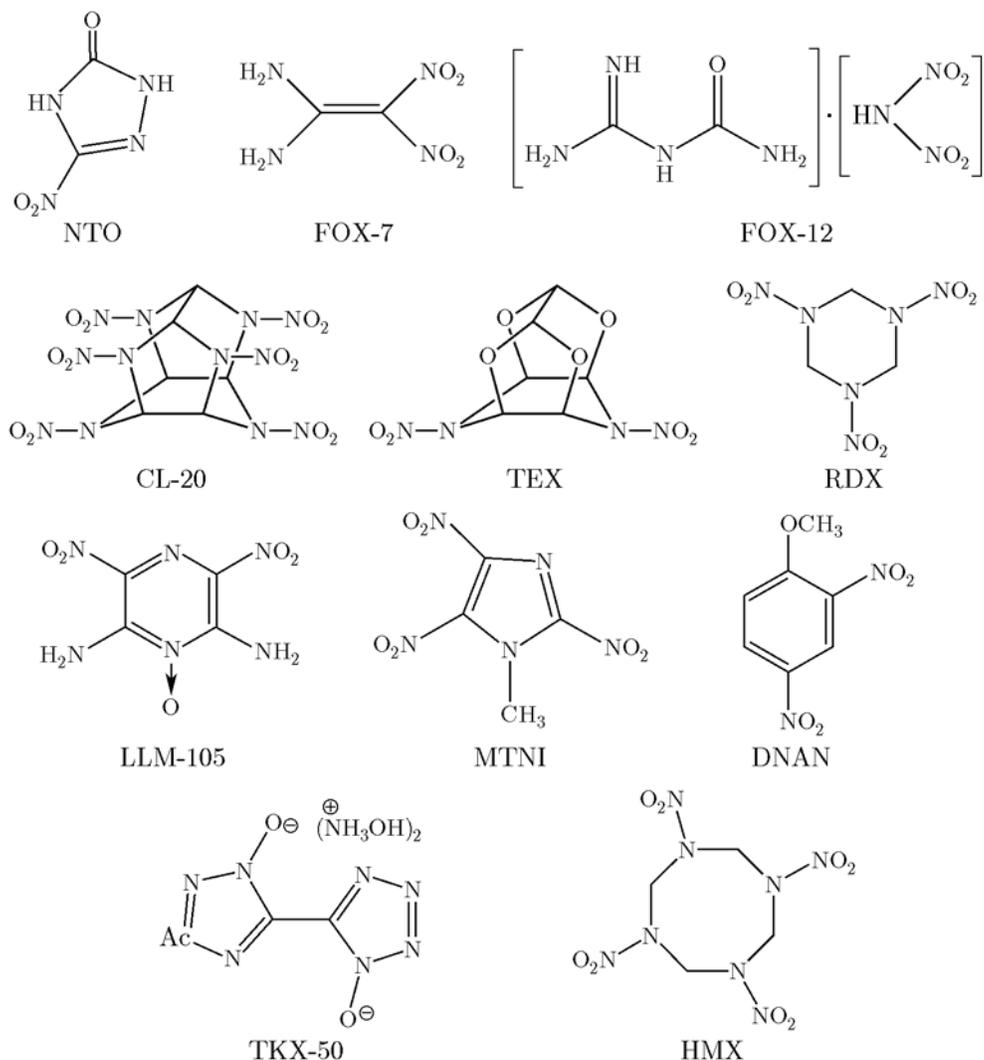


Рис. 1. Некоторые высокоэнергетические молекулы для приложений в МБ

дов [8, 9]. Процесс производства NTO был разработан также и в Индии (HEMRL), вначале на уровне лаборатории, а затем ноу-хау процесса было передано в отрасль для укрупненного производства до 5 кг/партия. Синтезированные кристаллы NTO в первоначальном виде не подходят для производственного применения. Потребовались исследования по модификации характеристик частиц [8] для достижения желаемой морфологии и размера кристаллов NTO. Некоторые малочувствительные взрывчатые и метателные составы, содержащие NTO, представлены в табл. 3.

Исследования составов литевых ВВ проводились преимущественно для армии США. Композиции, включающие в себя смеси TNT и NTO (TNTO), обозначаются AFX [9, 10]. Со-

став AFX-644 (также именуемый TNTO IV) прошел все испытания серии HD 1.6 по бомбе Mk-82 общего назначения. Аналогичным образом был приготовлен и изучен состав AFX-645, оказавшийся существенно менее чувствительным к удару, чем ВВ, используемые в бомбах Mk-82, без ущерба для эксплуатационных характеристик.

TNTO IV представляет собой литевую взрывчатую композицию на основе NTO, десенсибилизированную воском, с TNT в качестве энергетического связующего и алюминиевым порошком для улучшения характеристик взрыва [11]. Разработанный плавящийся состав высокоэнергетического ВВ общего назначения был подвергнут ряду испытаний на производительность и чувствительность. Ско-

Таблица 2

Энергетические свойства твердых энергетических материалов (ВЭМ) для составов МБ

Твердые ВЭМ	ρ , г/см ³	ΔH_f , кДж/моль ^e	КБ, %	V_D , м/с ^e	$P_{СЛ}$, ГПа	ДСК, °С	Удар, Н·м ^a	Трение, Н ^b	Искра, Дж ^c	Применение ^d
НТО	1.91	-129.7	-24.6	8 120	30.7	>252	17.5	>360	>4.5	НЕ, GP
FOX-7	1.88	-53.2	-21.6	8 800	36	254	25	>360	>5.0	НЕ, GP, RP
FOX-12	1.75	-355.6	-19.2	8 210	25	215	32	>360	>3.0	НЕ, GP
LLM-105	1.91	-37.7	-37.1	8 560	35	334	24	>360	>4.0	НЕ, GP, RP
CL-20	2.04	377.4	-11	9 400	41.9	>220	5.6	140	2.5	НЕ, GP, RP
TEX	1.99	-445.6	-42.7	8 570	31	307	>35	>360	4.5	НЕ, GP, RP
DNAN	1.55	-186.7	-96.9	6 740	16	95 ^f	>22	180	4.5	Литьевое НЕ
MTNI	1.77	153.9	-25	8 740	29	85 ^f	16	>360	—	Литьевое НЕ
RS-RDX	1.82	61.78	-22	8 750	34.3	204	8.4	120	5	НЕ, GP, RP
TKX-50 ^e	1.88	446.6	-27.1	9 698	42.4	221	20	120	0.10	НЕ, GP, RP

Примечания. ρ — плотность, ΔH_f — энтальпия образования, КБ — кислородный баланс, V_D — скорость детонации, $P_{СЛ}$ — давление Чепмена — Жуге, ДСК — дифференциальная сканирующая калориметрия. ^aЧувствительность к удару, измеренная на установке с падающим грузом массой 2 кг. ^bЧувствительность к трению, измеренная с использованием фрикционного прибора ВАМ. ^cЧувствительность к искровому разряду. ^dНЕ — высокоэнергетическое взрывчатое вещество, GP — орудийные заряды, RP — ракетные топлива. ^eЗначения ΔH_f и V_D ниже прогнозируемых величин. ^fТочка плавления.

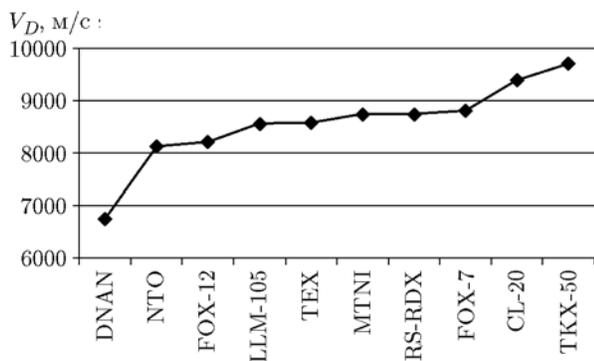


Рис. 2. Скорость детонации твердых высокоэнергетических взрывчатых веществ

рость детонации ВВ составила 6 434 м/с при плотности 1.79 г/см³. Таким образом, было показано, что литьем из расплава можно изготовить высокоэффективное ВВ, которое не детонирует ни при быстром, ни при медленном нагреве [12].

В США изготовлено множество композиций, содержащих НТО. Некоторые из них аттестованы как МБ-композиции согласно тесту ООН серии 7. В ВМС США также были изучены две композиции, состоящие из 28 % НТО, 56 % НМХ и связующего НТРВ, отличающиеся

размером частиц НМХ [13].

В Соединенном Королевстве малочувствительные составы пластических ВВ, использующие НТО совместно с энергетическими нитраминами, исследовали в [14, 15]. Для того чтобы компенсировать незначительные потери рабочих характеристик при замене более энергетического нитрамина на НТО, в состав энергетического пластификатора К10 вводили энергетическое связующее poly-NIMMO и заменяли RDX на НМХ в композициях СРХ 412 и 413. Включение НТО в листовой взрывчатый состав привело к заметному увеличению плотности, улучшению механических свойств, а также к росту скорости детонации примерно на 700 м/с по сравнению с исходным составом на базе RDX [16]. Разработан взрывчатый состав XF-11585 на основе RDX/НТО и TNT в качестве связующего. Характеристики его детонации очень схожи с таковыми для композиции XF-13333. Это был первый состав EIDS согласно STANAG 4170 [17]. Пластические ВВ, содержащие 95 % смеси RDX/НТО или НМХ/НТО и 5 % политетрафторэтилена (PTFE), были изучены с целью производства ими перфораций при добыче нефти. Заряды, содержащие смеси RDX/НТО, позволяют проводить пер-

Таблица 3

Малочувствительные взрывчатые и твердотопливные составы, содержащие NTO

Название	Состав	Результаты/пояснения	Источ-ник
Тритонал (стандарт)	TNT 80 % Al 20 %	V_D : 6 770 м/с при плотности 1.76 г/см ²	—
AFX-644 (TNT0 IV)	NTO 40 % TNT 30 % Al 20 % D2 воск 10 %	— Рабочие характеристики, аналогичные тритоналу — Проблема экссудации и трудоемкое производство — V_D : 97 % от скорости детонации тритонала — Прошел все тесты серии HD 1.6 — Бомба Mk-82 общего назначения — Соответствует критериям ООН в отношении чрезвычайно малочувствительных детонирующих веществ (EIDS)	[9, 11]
AFX-645	NTO 48 % TNT 32 % Al 12 % I-800 Ganex 8 %	— Уменьшенная экссудация и менее трудоемкое производство — Улучшенная производительность — V_D : 101 % от скорости детонации тритонала	[11]
Литьевой состав (TE-T7005)	Термопластичное связующее (ТТВ-531) NTO Другие ингредиенты — Al, ПХА и RDX	— Высокоэффективное литьевое ВВ — Малочувствительное ВВ общего назначения	[12]
Серия CPX (412, 413, 450, 458)	NTO 25 ÷ 50 % HMX 20 ÷ 47 % K10 10 % Poly-NIMO 10 % Металлическое горючее 20 %	— CPX-413 (NTO/HMX 45/35) прошел серию тестов HD 1.6 и серию из 7 тестов ООН (EIDS) — Производительность та же, что у Comp B* (для CPX-413: $V_D = 8 150$ м/с, $\rho = 1.74$ г/см ³) — Подводные взрывные заряды	[14, 15]
Листовые ВВ	RDX/NTO/Estane (85 : 15) (замена RDX на NTO 5 ÷ 25 %)	Увеличение V_D (на 700 м/с) по сравнению со стандартным составом, увеличение плотности, улучшение механических свойств	[16]
XF-11585	NTO 15 ÷ 30 % (200 ÷ 400 мкм) I-RDX 15 ÷ 30 % (315 ÷ 800 мкм) Al 0 ÷ 15 % TNT 20 ÷ 33 % Парафин и другие добавки 7 ÷ 10 %	— Перспективный кандидат для боеприпасов калибра 60 ÷ 120 мм — Характеристики детонации очень похожи на XF-13333 (31 % TNT, 48 % NTO, 7.5 % воска, 3.5 % Al, производится в больших масштабах и используется в снарядах калибра 155 мм)	[17]
Листовые ВВ	Бимодальная смесь: NTO 70 % (150 мкм)/30 % (25 мкм)	Оптимизирована максимальная загрузка твердых компонентов	[19]
IMX-101	DNAN 43 % NTO: 6 % (20 мкм) + 14 % (360 мкм) NQ: 37 %	— Замена TNT — Испытано для снаряда M795 калибра 155 мм и снаряда M1122 калибра 105 мм	[20]
IMX-104	DNAN 40 % NTO 53 % RDX 15 %	— Замена Comp B — Проведена оценка для заряда миномета калибра 81 мм, запланировано для калибров 60 и 120 мм — V_D : около 90 % от скорости детонации Comp B	[21]

Примечания. Взрывчатая композиция Comp B изготовлена из TNT (39.5 %), RDX (59.5 %) и воска (1 %), $V_D = 7 620$ м/с, используется в полевых минах, ракетах и снарядах в качестве основного и промежуточного ВВ.

форирование на глубину 102 ÷ 117 мм, а при использовании NTO/HMX глубина составила 110 ÷ 125 мм [18]. Установлено влияние морфологии частиц NTO на микрометрические

характеристики бимодальной смеси (70 : 30), состоящей из крупных (150 мкм) и мелких (25 мкм) частиц, которая оптимально подходит для производства листовых малочувстви-

тельных взрывчатых составов [19]. Обнаружено, что литьевая композиция на основе сферических частиц НТО/ТНТ (60 : 40) в 2.5 раза менее чувствительна к удару и в 2 раза — к трению, чем Comp В [20]. В начале 2011 г. Британской многонациональной оборонной, охранной и аэрокосмической компанией (BAE Systems) и армией США разработана серия высокоэффективных малочувствительных литьевых составов взрывчатых веществ IMX (Insensitive Munitions eXplosives) для замены ТНТ в артиллерийских снарядах [21]. IMX обеспечивают мощность взрыва, эквивалентную ТНТ, но менее чувствительны к внешним воздействиям. Армия США сделала заказ на производство миллионов фунтов таких боеприпасов, производимых на заводе BAE в Холстоне [22, 23].

1.2. 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (FOX-7)

FOX-7 (или DADNE) выступает в качестве потенциального кандидата для применения в малочувствительных высокоэнергетических композициях [24]. Постоянно проводимая в ряде стран научно-исследовательская работа по FOX-7 позволила довести этот процесс до уровня пилотных предприятий. Ожидается, что чувствительность FOX-7 может быть такой же низкой, как у ТАТВ [25], а взрывные характеристики сопоставимы с характеристиками RDX и HMX [26]. FOX-7 впервые был синтезирован в 1998 г. [27]; с тех пор разработаны различные способы его синтеза. В настоящее время FOX-7 производится на экспериментальном заводе NEXPLO Bofors (Швеция) в многокилограммовом масштабе, а также в лаборатории авторов данной статьи [28]. Последние сведения по разработке малочувствительных взрывчатых и метательных составов на основе FOX-7 и данные по их характеристикам обобщены в табл. 4.

Термохимические расчеты показывают, что пластическое ВВ, основанное на FOX-7 и энергетическом связующем, может служить заменой Comp В даже при довольно низком содержании твердых компонентов. Такие композиции малочувствительны к трению и термическим стимулам и не детонируют при диаметре 25 мм [29]. Были также изучены заряды пластических ВВ, содержащие 95 % FOX-7, которые продемонстрировали значительное снижение чувствительности по гар-тесту в сравнении с RDX [30]. Различные энергетические

преполимеры могут быть использованы для получения композиций пластических ВВ с характеристиками, близкими к характеристикам Comp В. Лучшим выбором является poly-GlyN, затем идут глицидилазидный полимер GAP и энергетические оксетановые преполимеры ВАМО/АММО. Из результатов экспериментов следует, что добавление FOX-7 увеличивает устойчивость к ударной волне и вызывает снижение чувствительности в испытываемом образце пластического ВВ к механическому воздействию [31, 32]. Изучена интересная газогенерирующая композиция с пониженным выходом дыма и улучшенной механической стабильностью [33]. Сообщалось также о газогенерирующих композициях, содержащих FOX-7 в комбинации с неорганическими нитратами и оксидами. Найдено, что показатель степени в законе горения этих композиций равен $0.6 \div 0.8$ в зависимости от состава компонентов. Теоретически температура горения составляет около 2500 К при выходе газа 25 моль/кг [34].

Топлива, которые разрабатываются в Швеции (EURENCO Bofors), в основном базируются на комбинациях FOX-7 и RDX связующей системой, состоящей из энергетического пластификатора *n*-Bu-NENA (*n*-Butyl nitroxyethylnitramine) и нитроцеллюлозы (NC). Топливные составы, содержащие FOX-7, проходят испытания для пушки Bofors 40mm. Испытание на химическую стабильность согласно STANAG 4582 показывает, что композиции, содержащие FOX-7 с некоторыми наиболее распространенными стабилизаторами, характеризуются долговременной стабильностью [35]. Изучен топливный состав, состоящий из NC и САВ (бутерат ацетата целлюлозы), в котором также содержались FOX-7, FOX-12 и ADN вместе с пластификаторами [36].

Композиции для боеприпасов с низкой уязвимостью на основе смеси FOX-7 и HMX описаны в [37]. Был приготовлен состав, содержащий FOX-7 и энергетический полифосфазен polyPZ-E (95 : 5), и экспериментально установлено, что ударная чувствительность этого состава значительно ниже, чем у RDX и Comp В [38]. Было изготовлено и исследовано малочувствительное ракетное топливо с пониженным дымообразованием на основе композиции FOX-7 с содержанием твердых компонентов 68 ÷ 70 %. При использовании BDNPF/A (bis-(dinitropropyl)-formal/aldehyde) в качестве пластификатора композиции демонстрировали

Таблица 4

Малочувствительные взрывчатые и метательные составы, содержащие FOX-7

Название	Компоненты	Результаты/пояснения	Источник
Литьевые составы	FOX-7 poly-GlyN	Успешно прошли мало- и крупномасштабные испытания на безопасность	[29]
Заряд пластического ВВ	FOX-7 95 % или RDX, замещенный на FOX-7 Связующее (парафин, EPM, HyTemp и 0.5 % графит) 4.5 %	— Улучшенные тепловые и механические свойства — Измеренное значение $V_D = 8\,200 \div 8\,450$ м/с (равно V_D для RDX)	[30]
Заряд пластического ВВ	FOX-7 (250 ÷ 355 мкм) 50 % FOX-7 (<70 мкм) 20 % Poly-GlyN 21 % Bu-NENA 5 % H12MDI (Desmodur-W) 4 % Каталитическая добавка DBTDL	Имеет характеристики МВ	[31]
Прессованные заряды пластического ВВ	RDX, HMX или FOX-7 90 ÷ 95 % Флегматизирующий компонент PTFE 10 ÷ 5 %	Нечувствительность к ударным и механическим воздействиям без снижения рабочих характеристик	[32]
Газогенерирующий состав	FOX-7 51.9 % AN 48.1 %	— Увеличенный объем нетоксичного газа — Улучшенные механические свойства и характеристики чувствительности — Более низкая температура пламени и образующихся газов по сравнению с RDX	[33]
Орудийное топливо	FOX-7 60 % RDX, NC, NENA	— Улучшенные условия хранения — Производительность равна двухосновному топливу, но более низкая температура пламени — Скорость горения ≈ 55 мм/с при 100 МПа с показателем в законе горения около 1	[34]
Двухосновные топлива	NC 15 % CAB 3.5 ÷ 6 % RDX, HMX, NQ, FOX-7, FOX-12, ADN Связующее + пластификаторы	Малочувствительные орудийные топлива	[36]
Прессованный состав пластического ВВ	FOX-7 95 % Энергетический полифосфазин 5 %	— Менее чувствителен к удару, чем Comp B — Улучшенная совместимость со связующим и повышенная производительность	[37]
Ракетные топлива	FOX-7 68 ÷ 70 % AP 0 ÷ 42 % Полимерные связующие — GAP или инертный полиуретан Пластификаторы — TMETN/BTTN или BDNPF/A	— Малочувствительные, малодымные — Скорость горения до 20 мм/с при 7 МПа, низкий показатель в законе скорости горения	[39]
Топливные составы	FOX-7 + окислители (AP, ADN, AN и др.) 50 ÷ 90 % AMMO, poly-BAMO 5 ÷ 30 %	Экологичные, надежная воспроизводимость, увеличенный срок хранения	[40]
Высокоэнергетические составы	FOX-7 + нитраминами 20 ÷ 60 % Нитраты/перхлораты 5 ÷ 35 % Металлическое горючее 10 ÷ 40 %	— Малочувствительные, высокоэффективные — Могут использоваться для различных целей, в том числе для добычи полезных ископаемых	[41]

Примечания. EPM — этиленпропиленовый полимер (также обозначается как EPDM), HyTemp — полиакрилатные эластомеры, H12MDI (Desmodur-W) — гидрогенизированный MDI (HMDI) или диизоцианат дициклогексилметана, PTFE — политетрафторэтилен, CAB — бутерат ацетата целлюлозы.

довольно низкую термочувствительность. Топлива со связующим GAP и нитроэфирным пластификатором показывают высокое пороговое значение (21 мм) в условиях гар-теста, которое соответствует классу опасности HD 1.3 [39].

О топливе, в состав которого входят термopластичное эластомерное связующее, окислитель (FOX-7), оружейный порох (50 ÷ 90 % (мас.)) и небольшое количество металлического порошка, сообщалось в [40]. Взрывчатый состав, содержащий 20 ÷ 60 % (мас.) ВВ, состоящего из FOX-7 и/или смеси нитрамина, неорганических нитратов/перхлората и металлического горючего, описан в [41]. Гелеобразное топливо, предназначенное для ракетных двигателей, включающее в себя FOX-7 и нитрамина в качестве твердого окислителя, исследовалось в [42]. Малоуязвимые композиции высокоэнергетического ВВ (LOVEX) на основе FOX-7 рассматривали как возможную замену RDX в литьевых составах на основе TNT. Исследования показали, что литьевые композиции на основе FOX-7, как неалюминизированные, так и алюминизированные, менее уязвимы по сравнению с соответствующими композициями на основе RDX [43]. Испытания литьевой композиции, содержащей NTO, FOX-7, TNT, Al и воск, свидетельствуют о том, что FOX-7 может быть использован для создания литьевых ВВ с низкой чувствительностью, и эта композиция является перспективной в качестве основного наполнителя в зарядах, предназначенных для малоуязвимых боеприпасов [44]. Был изучен ряд литьевых составов, содержащих FOX-7 с TNT или DNAN, об их чувствительности к удару, трению и ударно-волновой чувствительности сообщалось в [45]. В обзоре [46] по FOX-7 и составам на его основе представлены их чувствительность и взрывчатые свойства. Высокоэнергетические листовые взрывчатые составы на основе FOX-7, полиуретана и GAP в качестве энергетического связующего описаны в [47] в сравнении с высокоэнергетическими листовыми материалами на основе RDX. Орудийное топливо на основе FOX-7 продемонстрировало улучшенные энергетические и баллистические свойства по сравнению с традиционными трехосновными топливами. Наблюдаемые тенденции в баллистике позволяют сделать вывод, что FOX-7 обладает хорошим потенциалом для обеспечения менее чувствительных и не зависящих от температуры характеристик в составах трехосновных топлив, используемых

для орудий большого калибра [48].

1.3. N-динитрамид гуанилмочевины (GUDN или FOX-12)

Соединение FOX-12 — это новый энергетический материал с чрезвычайно низкой чувствительностью и хорошим потенциалом для использования в качестве ракетного топлива или малочувствительного ВВ. FOX-12 пригоден для производства малоуязвимого топлива LOVA, а также литьевых и пластических высокоэнергетических ВВ. Компания EURENCO Bofors AB (Швеция) производит это соединение в больших количествах. Способ производства разработан фирмами FOI, NEXPL0, и в настоящее время FOX-12 используется для промышленного производства динитрамида аммония [49]. Способ синтеза FOX-12 разработан также в NEMRL (Индия) на лабораторном уровне. FOX-12 совместим с различными добавками, применяемыми для энергетических материалов. Поэтому ожидается, что он будет широко востребован в ракетных топливах, газогенерирующих составах и малочувствительных ВВ [50].

В работе [51] описано использование FOX-12 вместе с окислителем в бездымных газогенерирующих композициях для надувания подушек безопасности транспортных средств. В [52] шведские ученые продемонстрировали использование для этих целей твердых топлив на основе FOX-12 с регулируемой скоростью горения. Смесевое модифицированное двухосновное топливо (CMDB) на базе FOX-12, CL-20 и 3,4-динитрофуразанфуросана (DNTF) может быть безопасно произведено методом винтовой экструзии. Его показатель в законе скорости горения составляет менее 0.3 ÷ 0.7 при давлениях 4 ÷ 22 МПа [53]. Компания EURENCO Bofors AB провела оценку FOX-12 в качестве замены RDX в гексоле для применения в боеголовках. В результате получена литьевая композиция, которую можно использовать в боеприпасах таким же образом, как Comp B [54]. В настоящее время для орудия EURENCO Bofors 155mm разрабатываются топлива, содержащие FOX-12, FOX-7 и RDX, а также связующие. FOX-12 способствует понижению температуры пламени и обеспечению достаточной производительности при использовании в артиллерии или для пулеметов; ведутся работы по уменьшению истирания ствола орудия [55]. Нитраминные орудий-

Таблица 5

Малочувствительные взрывчатые и топливные составы, содержащие FOX-12

Устройство	Компоненты	Результаты/пояснения	Источ-ник
Генератор газа	Окислитель (AN, KN, KP, AP, оксиды и комплексы металлов): 10 ÷ 60 % Связующее: 0 ÷ 10 % Горючее FOX-12: 40 ÷ 90 %	Малочувствительный, бездымные газогенерирующие композиции с высокой скоростью горения (1.52 см/с при 13.8 МПа)	[51]
Приводимые в действие газом устройства безопасности	Горючее FOX-12: 5 ÷ 95 % Окислитель	Малочувствительный, регулируемая скорость горения, низкие выбросы загрязняющих веществ	[52]
Бомба HE	45 % FOX-12 в TNT	Замена RDX в гексотоле, испытано на гильзе HEER калибра 155 мм (ФРГ), аналогичная или лучшая фрагментация, чем у обычных гильз	[54]
Орудие Bofors 155mm	FOX-12, RDX Связующие	Очень низкая температура пламени, достаточная производительность орудия, низкое истирание ствола	[55]
Орудийное топливо	RDX или FOX-12 DNDA и NC	Малочувствительное, повышенная производительность, увеличение срока хранения	[56]

ные топлива на базе RDX с частичным включением FOX-12 и с DNDA в качестве энергетического пластификатора на основе нитроцеллюлозы продемонстрировали улучшенные рабочие характеристики и малую чувствительность. Об улучшенных характеристиках старения новых топлив, содержащих FOX-12, по сравнению с двух- и трехосновными топливами сообщалось в [56]. FOX-12 оценивают как возможную замену RDX в алюминизированных литьевых взрывчатых составах на основе TNT. В пользу этого свидетельствуют термические свойства и характеристики чувствительности составов на основе FOX-12 [57]. В табл. 5 приведена краткая информация о некоторых составах топлив и ВВ на основе FOX-12.

1.4. 2,4,6,8,10,12-гексанитрогексаазизовюрцитан (CL-20)

CL-20 (или HNIW) — ВВ нитраминного ряда, которое примерно на 20 % мощнее, чем HMX. Синтез CL-20 оказался прорывом в создании энергетических материалов с повышенными энергетическими характеристиками, минимальной сигнатурой (заметностью продуктов горения) и пониженными опасными свойствами [58]. CL-20 имеет многочисленные военные, а также коммерческие приложения с улуч-

шенной производительностью. Кумулятивные заряды на основе CL-20 уже используются в нефтедобывающей промышленности [59]. В настоящее время изучаются возможности применения CL-20 в производстве боеприпасов — от высокоэффективных орудийных топлив и малодымных ракетных топлив до кумулятивных зарядов и других [60]. Единственным ограничением является стоимость его производства, потребуется некоторое время, прежде чем удастся достигнуть достаточно низкой стоимости, сравнимой со стоимостью изготовления HMX [61]. Корпорация Thiokol (США) модифицировала первоначальный способ, описанный в [58], и расширяет производство до пилотного заводского масштаба. CL-20 в промышленном пилотном масштабе (50 ÷ 100 кг/партия) производится во Франции (SNPE) [62]. В Индии освоено производство CL-20 в экспериментальном масштабе (HEMRL, 5 кг/партия) с варьируемыми размерами частиц и предпринимаются дальнейшие усилия для разработки экономичного способа его производства.

CL-20 существует в четырех кристаллических формах, из которых ϵ -форма характеризуется наивысшей термостабильностью и высокой плотностью по сравнению с формами α , β и γ . Это соединение обладает большим по-

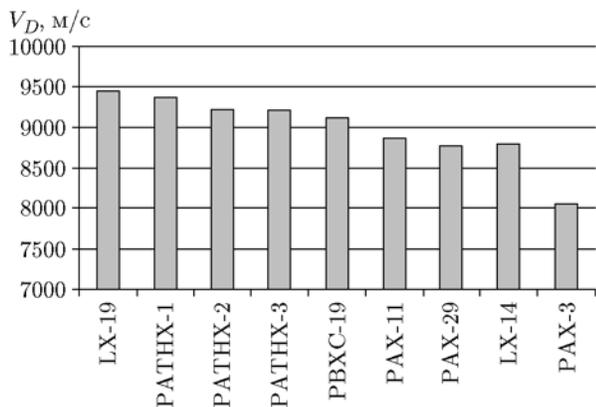


Рис. 3. Скорость детонации МБ-композиций на основе CL-20

тенциалом для производства высокоэнергетических малочувствительных боеприпасов (в составе пластического ВВ), удовлетворяющих экологическим требованиям к будущим системам вооружения. Для некоторых композитных взрывчатых составов удалось преодолеть трудности, связанные с высокой чувствительностью CL-20, и значительно улучшить мощность взрывчатых композиций, таких как PAX-11, PAX-12 и PAX-29 [63, 64]. Считается, что работы по изучению свойств CL-20 перешли от стадии лабораторных исследований в стадию практического применения (рис. 3). Создано большое число перспективных композиций, связанных с CL-20, и некоторые из них могут найти применение в системах вооружения (табл. 6).

В работе [65] описан метод прессования и/или экструдирования водной взвеси как способ получения высокоэффективных малочувствительных взрывчатых композиций и боеприпасов с использованием CL-20. Высокоэнергетическое малочувствительное (класс опасности 1.3) топливо на основе CL-20 с малой заметностью продуктов горения разработано и впервые успешно испытано в тактических ракетных двигателях [66].

Высокоэнергетическая малочувствительная взрывчатая композиция, содержащая CL-20, предназначенная для использования в деформируемых боеголовках, изучалась в [67]. Была предпринята попытка введения CL-20 в литьевую композицию на основе TNT/ETPE (энергетический термопластичный эластомер), чтобы создать малочувствительную композицию с пониженным неблагоприятным воздействием на экологию. Показано, что

CL-20 претерпевает структурные изменения (изменение полиморфизма) в расплавленном TNT, которые вызывают повышение чувствительности и снижение плотности заряда [68]. Также изучается возможность использования CL-20 в качестве нового компонента в малочувствительных топливных и взрывчатых композициях, содержащих энергетический сополиуретановый термопластичный эластомер (ETPE) на основе GAP [69]. Несколько композиций пластических ВВ с 85 ÷ 95 % CL-20 в составе получены в количестве 22 ÷ 26 фунтов, при этом использовались как энергетические, так и инертные системы связующее/пластификатор. В [70] проведено сравнение их свойств с LX-14.

Разработан новый состав оружейного заряда с CL-20 в качестве основного энергетического компонента. Он имеет силу пороха 1253 Дж/г, температуру сгорания менее 3700 К, эти характеристики сопоставимы с метательным зарядом для пушки JA2 [71]. Привлекательный подход к созданию оружейных зарядов на основе высокоэнергетических композиций с низкой чувствительностью, в которые входят энергетические оксетановые преполимеры ВАМО/АММО с CL-20, RDX и высокоэнергетические оружейные топлива с термопластичными эластомерами, описан в [72]. Основанные на CL-20 алюминизированные смеси модифицированные двухосновные топлива (СМДВ) обеспечивают более высокую скорость горения, чем СМДВ на основе RDX/AP, и, как было обнаружено, менее уязвимы к механическим воздействиям. Результаты измерений свидетельствуют о значительном увеличении скорости горения и удельного импульса [73]. В патенте США [74] описан новый литьевой термобарический взрывчатый состав; для управления рабочими характеристиками могут быть добавлены пластификатор и катализатор скорости горения. Эффективность алюминизированных составов с CL-20 для повышения производительности, мощности взрыва и снижения чувствительности проявила себя в ряде взрывчатых приложений, продемонстрировано их успешное использование в кумулятивных зарядах, проникающих взрывных перфораторах, фрагментирующих боеголовках, усиленных взрывных и многоцелевых боеголовках [75].

Специально для перфорации нефтяных и газовых скважин было разработано компози-

Таблица 6

Некоторые перспективные малочувствительные взрывчатые и топливные составы, содержащие CL-20

Состав	Компоненты	Результаты/пояснения	Источник
Прессованные пластиковые ВВ	CL-20: 85 ÷ 96 % Инертное связующее: 3 ÷ 4 % Пластификаторы и добавки	— Высокая производительность и низкая чувствительность — Гранаты, полевые мины, ракетные боеголовки и ВВ	[65]
	CL-20 (3 мкм): 35 ÷ 45 % Энергетическое связующее и нечувствительные к ударам ВВ	— Высокоэнергетический, малая чувствительность к удару — Деформирующиеся боеголовки	[67]
Литьевые составы	CL-20/TNT Энергетический термопластичный эластомер (ETPE)	— CL-20 структурно изменяется в расплавленном TNT (из ϵ -CL-20 в β -CL-20) — Повышение чувствительности и снижение плотности	[68]
Составы пластиковых ВВ	CL-20: 85 ÷ 95 % Энергетические и инертное связующее/пластификатор системы	При испытании в боеголовке с взрывным пенетратором показатели лучше, чем у LX-14*	[70]
LX-19	ϵ -CL-20: 95.8 % Термопластичный эластомер: 4.2 % Estane	$V_D = 9440$ м/с, $\rho = 1.959$ г/см ³ Самая мощная бризантная взрывчатка, улучшенная производительность по сравнению с LX-14*	—
PATHX-1 PATHX-2 PATHX-3 PBXC-19	CL-20: 88 ÷ 95 %; Estane CL-20: 92 ÷ 95 %; Estane CL-20: 95.5 ÷ 95.8 %; Estane CL-20: 95 %; EVA	$V_D = 8890 \div 9370$ м/с, $\rho = 1.868 \div 1.944$ г/см ³ $V_D = 8850 \div 9220$ м/с, $\rho = 1.869 \div 1.923$ г/см ³ $V_D = 9208 \pm 10$ м/с, $\rho = 1.942$ г/см ³ $V_D = 9120 \pm 10$ м/с, $\rho = 1.927$ г/см ³ — Повышенная производительность по сравнению с LX-14*	[63]
Прессованные пластиковые ВВ	CL-20: 66.8 ÷ 72.1 %; HTPB HMX: 66.8 ÷ 72.1 %; HTPB	$V_D = 8320 \div 8470$ м/с, $\rho = 1.618 \div 1.710$ г/см ³ $V_D = 8030 \div 8107$ м/с, $\rho = 1.575 \div 1.648$ г/см ³	[63]
	CL-20: 96 %; HyTemp: 1 % DOA: 3 %	$V_D = 9018$ м/с, $\rho = 1.901$ г/см ³ Более высокое значение V_D (на 270 м/с) по сравнению с HMX — пластиковое ВВ	[63]
PAX-11	79 % CL-20; 15 % Al; 2.4 % CAB; 3.6 % BDNPF/A	$V_D = 8870$ м/с, $P_D = 39.5$ ГПа, $\rho = 2.023$ г/см ³	[63]
PAX-29	77 % CL-20; 15 % Al; 3.2 % CAB; 4.8 % BDNPF/A	$V_D = 8770$ м/с, $P_D = 38.3$ ГПа, $\rho = 2.002$ г/см ³ Меньшая чувствительность и более высокая производительность, чем у PAX-3**	[63]

*LX-14: 95.8 % HMX, 4.2 % Estane, $V_D = 8790$ м/с ($\rho = 1.835$ г/см³).**PAX-3: 64 % HMX, 20 % Al, 6.5 % CAB, 9.5 % BDNPF/A ($V_D = 8060$ м/с).

ционное ВВ, включающее в себя ϵ -CL-20 в качестве основного материала заряда, а также пластификатор и связующее, его готовили термическим прессованием при температуре 90 ÷ 120 °С. Результаты показали, что на время сжатия снижается риск перехода к β -полиморфу CL-20 [76]. Определение методом FTIR полиморфной чистоты ϵ -CL-20, загрязненного другими полиморфами, изложено в [77]. Приготовление и трансформация различ-

ных полиморфных форм CL-20 методом осаждения и результаты их исследования методами микроскопии и колебательной спектроскопии описаны в [78]. Изготовленный бустерный взрывчатый состав на основе CL-20/GAP продемонстрировал низкую ударную чувствительность [79]. В [80] сообщается о влиянии включения CL-20 на рабочие характеристики, чувствительность, тепловые и механические свойства листовых взрывчатых композиций.

Таблица 7

Некоторые малочувствительные взрывчатые составы, содержащие ТЕХ

Составы	Компоненты	Результаты/пояснения	Источник
Безметалльные высокоэнергетические композиции	Красный фосфор: 10 ÷ 82 % Нитрамини: 15 ÷ 86 % Связующие	Пригодны для применения в реактивных артиллерийских снарядах, минометных и артиллерийских гранатах	[85]
Высокоэнергетические твердые пресованные пластические ВВ	PGN: 1 ÷ 9 % Окислитель ТЕХ: 91 ÷ 99 %	Высокие давление и скорость детонации, превосходная способность ускорять металлические мишени	[88]
Литьевые ВВ, мощность в ≈ 1.35 раза выше, чем у чистого TNT, аналогичные или улучшенные характеристики по сравнению с композициями на основе RDX/НТО, Н-6* используется для подводных боеприпасов	RDX/TNT 75/25 ТЕХ/TNT 75/25 Н-6 (RDX) Н-6 (ТЕХ) AFX-644 (НТО) AFX-644 (ТЕХ)	$V_D = 8435$ м/с, $P_D = 32.47$ ГПа, $\rho = 1.773$ г/см ³ $V_D = 8306$ м/с, $P_D = 32.85$ ГПа, $\rho = 1.893$ г/см ³ $V_D = 7367$ м/с, $P_D = 23.24$ ГПа, $\rho = 1.773$ г/см ³ $V_D = 7236$ м/с, $P_D = 23.28$ ГПа, $\rho = 1.852$ г/см ³ $V_D = 7312$ м/с, $P_D = 24.25$ ГПа, $\rho = 1.903$ г/см ³ $V_D = 7487$ м/с, $P_D = 26.02$ ГПа, $\rho = 1.934$ г/см ³	[89]

Примечание. *Н-6: 44 % RDX и NC; 29.5 % TNT; Al 21 %; 5 % парафина; 0.5 % CaCl₂.

1.5. 4,10-динитро-2,6,8,12-тетраокса-4,10-диазаизовюрцитан (ТЕХ)

ТЕХ способен удовлетворять очень строгим требованиям, предъявляемым к применению в коммерческих или военных ВВ. Синтез ТЕХ впервые описан в [81]. Позже способ модифицировали для достижения большого выхода и высокой чистоты с использованием различных реагентов/катализаторов [82]. Компания Thiokol (США) разработала усовершенствованный двухступенчатый способ синтеза ТЕХ из легкодоступных и недорогих материалов. Предпринимаются попытки улучшения процессов синтеза ТЕХ высокой чистоты [83].

ТЕХ может быть использован либо отдельно, либо в комбинации с другими известными или новыми твердыми взрывчатыми компонентами для получения малочувствительных взрывчатых композиций с очень высокими рабочими характеристиками, для разработки различных высокоэффективных ВВ, включая литьевые взрывчатые составы с использованием связующего и пластификатора, а также металла и окислителя (табл. 7).

В [84] проведено исследование безметалльных зарядов ВВ, содержащих красный фосфор, нитрамин (ТЕХ) и связующее. Такие составы широко используются для снаряжения ре-

активных артиллерийских снарядов, ручных, минометных и артиллерийских гранат. Топлива, содержащие ТЕХ и полимерные связующие, предназначенные для применения в качестве двух- и трехосновных ракетных твердых топлив, были изучены в [85]. В [86] исследована композиция, включающая в себя ТЕХ в качестве высокоэнергетического ВВ, металлический порошок, пластификаторы и связующие на основе воска, для создания не содержащих TNT литьевых ВВ. Устройство пожаротушения для вдува огнегасящего газа в пламя описано в [87]. Состав с включением ТЕХ и связующего генерирует при горении один или несколько продуктов, способных подавлять пожар [88]. В [89] сообщалось о разработке литьевой высокоэнергетической взрывчатой композиции, содержащей ТЕХ и реакционноспособные металлы (типичные скорости детонации > 8000 м/с), с высокими рабочими характеристиками и низкой чувствительностью для производства взрывных работ. Литьевой состав с ТЕХ по взрывчатым свойствам сопоставим с ВВ типа Comp В, но при этом является малочувствительным и лишен токсичности, свойственной Comp В [90]. Недавно сообщалось [91] об усовершенствованном способе синтеза ТЕХ с выходом 65 %.

1.6. RS-RDX и RS-HMX

В последнее время в области технологии изготовления малочувствительных боеприпасов привлекает внимание модификация RDX под названием «RDX с пониженной чувствительностью» (RS-RDX) [92, 93]. RS-RDX, введенный в литые отверждаемые и даже в прессуемые пластические ВВ (композиции пластических ВВ), может снизить чувствительность к удару по гар-тесту [94]. Факторы, влияющие на ударную чувствительность RDX, включая морфологию кристаллов, количество внутренних и поверхностных дефектов кристаллов, описаны в [95]. Установлено [96], что RS-RDX сохраняет свойственную ему низкую чувствительность даже после старения, что отличается от поведения стандартного RDX, получаемого способом Бахмана. Страны НАТО активно участвуют в изучении RS-RDX. В Индии (HEMRL) разработан способ производства RS-RDX, позволяющий получать до 5 кг в партии. При включении в состав пластических ВВ он обеспечивает двукратное понижение чувствительности к удару по сравнению со стандартным RDX. Кроме того, в HEMRL разрабатываются топлива класса HD 1.1 на основе RS-RDX с более высоким содержанием твердого вещества для увеличения удельного импульса по сравнению с топливом на основе стандартного RDX. Качество кристаллов RS-RDX после старения не изменилось по сравнению с исходным RS-RDX. Ударная чувствительность композиций пластических ВВ, основанных на состаренном RS-RDX, и состаренных пластических ВВ (со стандартным RDX) также не претерпела изменений [97]. Были изучены композиции пластических ВВ на основе RDX и RS-RDX (оба — от компании DYNOL NOBEL) с включением в состав по 12 % связующего НТФВ. Два пластических ВВ, содержащие RDX пониженной чувствительности (RS B-2141 и RS PBXN-109), продемонстрировали увеличенную взрывную мощность по сравнению с составом на основе стандартного RDX. Это может быть обусловлено более гладкой морфологической структурой кристаллов RS-RDX, обеспечивающей более плотную упаковку заряда [98]. Исследование связи морфологии кристаллов RS-RDX с ударной чувствительностью пластического ВВ описано в [99].

HMX является превосходным ВВ с высокими плотностью кристаллов, скоростью и теплотой детонации [100]. Однако из-за повы-

шенной чувствительности его небезопасно использовать в композициях МБ. Было проведено много исследований по снижению чувствительности HMX, а также по получению RS-HMX по той же процедуре, что используется для RS-RDX [101]. Различные образцы HMX были испытаны как в прессуемых, так и в отверждаемых литевых композициях. Эксперименты проводили со стандартным HMX и с кристаллами HMX пониженной чувствительности (RS-HMX). Из полученных результатов следует, что улучшение ударной чувствительности более значительно в случае отвержденной литевой композиции PBXN-110 и для относительно мягких прессованных композиций, таких как PBXN-9 и PBXW-11, по сравнению с достаточно твердыми композициями типа PBXN-5 и LX-14. Кроме того, установлено, что RS-HMX и RS-RDX имеют одинаковый уровень пониженной чувствительности к удару. Старение RS-HMX при 60 °С в течение 18 месяцев не обнаружило какого-либо ухудшения ударной чувствительности [93].

1.7. 2,6-диамино-3,5-динитропиразин-1-оксид (LLM-105)

Соединение LLM-105 является недавней разработкой в классе малочувствительных высокоэнергетических ВВ. По рабочим характеристикам и чувствительности оно стоит между HMX и ТАТВ [102]. Эти комбинированные свойства делают LLM-105 перспективным энергетическим материалом для приложений, которые требуют умеренной производительности и малочувствительных характеристик. Однако использование этого материала ограничено высокой себестоимостью. Необходимы целенаправленные исследования для создания простого способа синтеза LLM-105. Был разработан новый трехстадийный способ синтеза LLM-105 с общим выходом 43.5 % [103]. В [104] представлен обзор различных подходов к синтезу LLM-105 за последние 20 лет. Испытания [105] малочувствительной взрывчатой композиции 97.5 % LLM-105 + 2.5 % Viton А показали ее высокие рабочие характеристики и малую чувствительность, сравнимую с композициями на основе ТАТВ. Несколько композиций с LLM-105 разработаны в Национальной лаборатории Лоуренса в Ливерморе (США). Созданные бустерные материалы отличались большей энергией по сравнению с композициями на

основе ультрамелкодисперсного ТАТВ. Испытания композиций с LLM-105 продемонстрировали их очень низкую чувствительность и показали, что LLM-105 можно использовать в системах инициирования, а также в качестве основного материала заряда. В работе [106] изучено действие энергетического ингибирующего покрытия на основе LLM-105 на зерна оружейных топлив: уменьшается скорость горения на поверхности зерна и обеспечивается прогрессивное сгорание топлива. В работе [107] проведена оценка LLM-105 на предмет его токсикологических характеристик исходя из того, что LLM-105 должен быть малотоксичным в рамках обычного производственного процесса, для обеспечения безопасности производства.

1.8. 1-метил-2,4,5-тринитромидазол (MTNI)

В течение долгого времени TNT был основой многих литьевых составов. Однако его низкие параметры по сравнению с главными высокоэнергетическими компонентами не позволяют улучшать рабочие характеристики литьевых взрывчатых составов в соответствии с требованиями, предъявляемыми к высокоэффективным системам боеприпасов. Необходимо разработать перспективные компоненты с превосходящими TNT свойствами. Недавно получен [108] 1-метил-2,4,5-тринитроимдазол (MTNI), который обладает как хорошей термостойкостью, так и малой чувствительностью к удару, и имеет при этом температуру плавления $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. MTNI синтезируют из 4-нитроимдазола методом ступенчатого нитрования. Расчет параметров детонации MTNI [109] свидетельствует о том, что его характеристики примерно на 30 % лучше, чем у ТАТВ. Хороший баланс кислорода и результаты измерения теплоты образования указывают на то, что MTNI может улучшить характеристики твердого топлива. В работе [110] расчет по программе Cheetah 3 дал следующие результаты: скорость детонации 7997 м/с (TNT — 7236 м/с), давление детонации 28.8 ГПа (TNT — 20.7 ГПа). Теоретические расчеты позволяют предположить, что взрывные характеристики MTNI достаточно близки к характеристикам RDX [110]. Усилия следует сосредоточить на развитии альтернативных путей синтеза MTNI при хорошем выходе (80 %) [111]. Недавно опубликован улучшенный способ синтеза MTNI и данные о его

поведении при термическом воздействии в смеси с взрывчатыми компонентами [112]. В целом, рассчитанные энергетические параметры и данные о чувствительности показывают, что MTNI — многообещающий представитель малочувствительных ВВ, его взрывные характеристики сопоставимы с RDX, а чувствительность занимает положение между RDX и TNT. Кроме того, вследствие низкой температуры плавления MTNI полагают превосходным кандидатом на включение в литьевые ВВ с целью увеличения мощности взрыва.

1.9. 2,4-динитроанизол (DNAN)

Другим перспективным ингредиентом для литьевых композиций является DNAN, который был изучен в ряде составов (табл. 8). По сравнению с TNT он имеет только 90 % его взрывной мощности и меньшую плотность [113]. Температура плавления DNAN выше ($94\div 95\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем TNT ($78\div 81\text{ }^{\circ}\text{C}$), но ее легко понизить на несколько градусов путем добавления небольшого количества растворимых в расплаве добавок, таких как N-метил-4-нитроанилин (MNA). В частности, был разработан простой состав ARX-4027, содержащий 60 % RDX, 39.75 % DNAN вместе с 0.25 % MNA, который позволил оценить эффективность использования DNAN в литьевых составах. Было показано, что ARX-4027 имеет более низкую вязкость по сравнению с Comp B, при этом удается осуществить более высокую загрузку RDX и не получить существенной разницы в механической прочности [114].

Компания Picatinny разработала более 24 рецептов PAX (Picatinny Arsenal Explosive), включающих в себя энергетические наполнители, связующие и в некоторых случаях пластификаторы, и испытала для армии США новое поколение более мощных ВВ. Взрывчатая композиция PAX-21 имеет более низкую стойкость, не содержит TNT и несколько менее токсична, чем Comp B. Кроме того, PAX-21 демонстрирует достаточно малую чувствительность в боеприпасах и хорошие термические характеристики. PAX-2A (HMX 85 %, BDNPA/F 9 %, CAB 6 %) был первым высокоэффективным малочувствительным взрывчатым составом в армии США. Он менее чувствителен к инициированию внешними источниками, но сохраняет все необходимые рабочие характеристики высокоэнергетических ВВ, которые использовались в прошлом. Ведется усовершен-

Таблица 8

Малочувствительные взрывчатые составы на основе DNAN

Состав	Компоненты	Замещение	Приложения	Замечания	Источник
OSX-12	Алюминизированный IMX-104	PAX-28	Мощные взрывные применения	Алюминизированная версия IMX-104, обеспечивающая превосходные свойства МБ и высокую энергию взрыва. Значение V_D около 90 % от такового для Comp B	—
PAX-21	RDX: 31 % (8 мкм) + 5 % (100 мкм), DNAN: 34 %, AP (200 ÷ 400 мкм): 30 % MNA	Comp B	Основной компонент для минометных снарядов M768 60 мм, 120 мм	В настоящее время сертифицирован для 60-миллиметровой минометной системы	[113]
PAX-24	DNAN, AP, MNA	TNT	Артиллерийские и другие крупнокалиберные боеприпасы	—	[113]
PAX-25	RDX: 20 %, DNAN: 59.75 %, AP: 20 %, MNA: 0.25 %	Comp B	Минометные боеприпасы	Повышенная взрывная производительность, прохождение крупномасштабного гар-теста	[115]
PAX-26	DNAN, Al, AP, MNA	Тритонал	Бомба общего назначения	—	[115]
PAX-28	RDX (3 мкм): 20 %, DNAN: 39.75 %, Al: 20 %, AP (50 мкм): 20 %, MNA: 0.25 %	Comp B	Унитарные боеголовки	Коэффициент эквивалентности с Comp B определен равным 1.62	[116]
PAX-40	HMX, DNAN, MNA	Октол	Основной компонент для гранаты SPIDER	—	[117]
PAX-41	RDX, DNAN, MNA	Циклотол	Основной компонент для гранаты SPIDER	Сертифицированы и используются для гранаты SPIDER в американской армии	[117]
PAX-48	DNAN, NTO, HMX	Comp B	Боеприпасы для минометов и танков	Обеспечивает превосходные характеристики МБ и энергетические свойства. Протестировано на 60-миллиметровом миномете и боеприпасах 120 мм для танка HE-T (FMS)	[115]

ствование его рабочих характеристик, анализируются опасности его применения в различных существующих и будущих конфигурациях для боеголовок боеприпасов сухопутных войск, военно-морских и военно-воздушных сил. Рецептуры PAX-40 и 41 отличаются повышенной скоростью детонации и меньшей чувстви-

тельностью к удару, чем Comp B. В Defence Science and Technology Organisation (Австралия) разработано несколько новых литевых взрывчатых составов, основанных на DNAN. Изучение их характеристик продемонстрировало уменьшенную чувствительность этих составов. Использование DNAN позволяет задей-

ствовать традиционные установки для литья ВВ без существенной их модификации, которая может потребоваться для производства мало-чувствительных взрывчатых композиций, основанных на литевых полимеризующихся ВВ. Недавно были проведены исследования на крышах по оценке токсичности DNAN и полученная информация, требующаяся для обеспечения охраны здоровья военного и гражданского персонала [118].

1.10. 5,5'-бистетразол-1,10-диолат дигидроксиламмония (ТКХ-50)

В ряде недавних публикаций показано, что введение N-оксидов в структуру тетразолов для улучшения их энергетических свойств приводит к образованию комплексов с более высокими удельной массой и стабильностью, с пониженной чувствительностью и улучшенным балансом кислорода [119]. На базе этих исследований в 2012 г. было разработано новое высокоэнергетическое вещество — 5,5'-бистетразол-1,10-диолат дигидроксиламмония (ТКХ-50) [120]. После обнаружения у ТКХ-50 выдающихся характеристик как взрывчатого вещества потребовалось разработать другой путь получения его предшественника 5,5'-бистетразол-1,10-диола. ТКХ-50 имеет кристаллическую плотность 1.877 г/см^3 при $25 \text{ }^\circ\text{C}$, обладает низкими тепловой чувствительностью и токсичностью, безопасен в обработке, что позволяет заменить им RDX [121]. ТКХ-50 — одна из самых перспективных ионных солей, создаваемых в качестве возможной замены для RDX. ТКХ-50 имеет высокие скорость детонации и давление Чепмена — Жуге и вместе с тем низкую чувствительность к трению и удару. Известно, что в американской армии планируется полномасштабное использование ТКХ-50. Соответственно, целесообразно рассмотреть новые пути его синтеза, а также полнее охарактеризовать параметры этого соединения. В NEMRL (Индия) уже запущен лабораторный процесс синтеза ТКХ-50 и осуществляется запуск его пилотного производства [122]. ТКХ-50 хорошо совместим с другими энергетическими наполнителями, связующими и пластификаторами, а также с большинством металлов и металлических оксидов. Для обеспечения стабильной совместимости крайне важна его чистота [123]. В [124] показано, что включение ТКХ-50 в состав пластического ВВ приводит к улучшению его ме-

ханических свойств. Эффективность действия взрыва ТКХ-50, как было установлено в [125], выше, чем у RDX, и ниже, чем у HMX. Все характеристики ТКХ-50 делают его не только подходящим материалом для давно существующей цели «зеленой» замены RDX, но и материалом высокой производительности. Литьевые композиции на основе ТКХ-50 превосходят композиции на основе HMX и RDX по энергетическим характеристикам и по безопасности, а по механическим свойствам — композиции на основе NTO [126]. Еще один литевой состав на основе ТКХ-50 был приготовлен с TNT в качестве диспергатора. Оценки характеристик безопасности и энергетического потенциала оказались выше, чем у композиций на основе HMX [127]. Энтальпия образования ТКХ-50 была измерена с помощью бомбовой калориметрии, полученный результат существенно отличается от опубликованного ранее значения [128]. В то же время экспериментальная оценка скорости детонации с использованием метода лазерно-генерируемой воздушной ударной волны оказалась для ТКХ-50 немного ниже прогнозируемого значения [129].

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПЛАСТИФИКАТОРЫ

Основная роль энергетических пластификаторов в составах энергетических материалов заключается в изменении механических свойств заряда для улучшения характеристик безопасности. Это достигается размягчением полимерной матрицы и приданием ей большей гибкости. В дополнение к тому, что пластификатор может улучшать такие свойства, как прочность на разрыв, удлинение, вязкость и точка размягчения (T_g), он может также влиять на уменьшение вязкости смеси для облегчения обработки, на изменение баланса кислорода и содержания энергии, а в случае ракетных топлив — способствовать адаптации скорости горения к требованиям баллистики [130]. Некоторые из перспективных энергетических пластификаторов и их свойства приведены в табл. 9 и на рис. 4.

2.1. N-бутил-N-(2-нитроксиэтил)нитрамин (Bu-NENA)

Bu-NENA представляет собой энергетический пластификатор на основе азотнокислого эфира, и он всё чаще берет на себя двойную

Таблица 9

Свойства некоторых энергетических пластификаторов для МБ [171–175]

Пластификатор	ρ , г/см ³	ΔH_f , кДж/моль	КБ, %	P_{vap} , Па, при 20 °С	T_g , °С	ΔH_c^* , кДж/моль	ДСК, °С
NG	1.59	-353	+3.52	0.236	—	1518	>180
TMETN	1.48	-443	-34.5	—	—	2808	182
BTTN	1.52	-406	-16.6	0.147	—	2179	230
BDNPA/F	1.39	-620	-57.6	—	—	—	150
Bu-NENA	1.22	-193	-104.3	—	—	3995	210
DNDA-57	1.35	-576	-72.3	—	-48	—	—

Примечания. ΔH_f — теплота образования, ΔH_c^* — теплота сгорания, P_{vap} — давление пара.

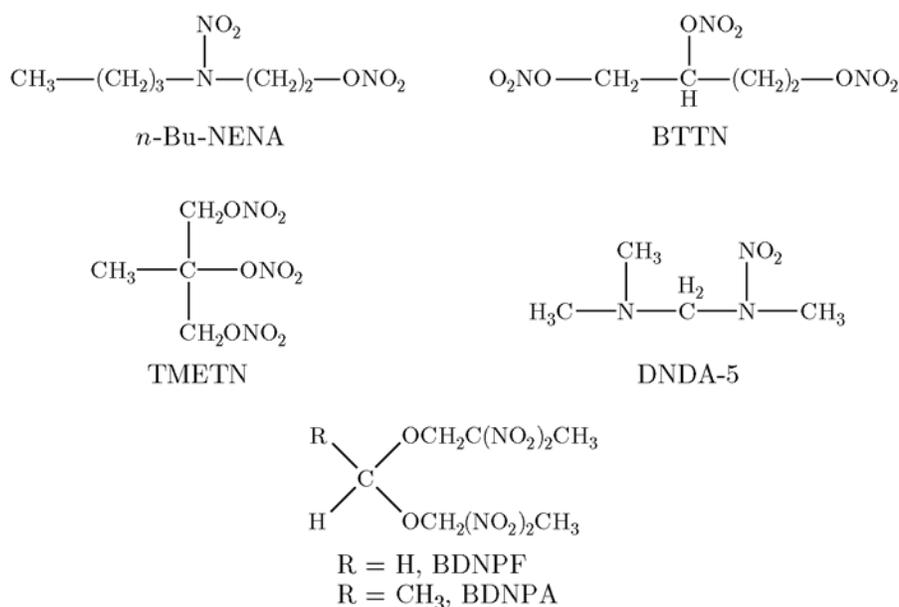


Рис. 4. Молекулярные структуры энергетических связующих для МБ-композиций

функцию — увеличения энергии и пластификации в целях улучшения механических свойств [131]. С момента своего синтеза Bu-NENA оказался в центре интенсивных исследований. Его стабильность и рабочие характеристики изучались в [132], а в [133] проведено кинетическое исследование термического разложения. Bu-NENA используется в твердых ракетных топливах, в одно-, двух- и трехосновных оружейных топливах, а также в малочувствительных составах высокоэнергетического ракетного топлива [134]. Добавление Bu-NENA в качестве пластификатора в составы с нитраминами улучшает их рабочие характеристики за

счет понижения температуры пламени и молекулярной массы газа по сравнению с существующими топливами [135]. Bu-NENA является лучшим выбором при разработке топлив для МБ на основе недорогого полимера эфира капролактона с гидроксильной концевой группой [136]. Сообщалось о малочувствительных высокоэнергетических твердых смесевых топливах, содержащих Bu-NENA наряду с динитратом триэтиленгликоля и окислителями с различным распределением частиц по размерам. Такая композиция позволяет не использовать экзотические катализаторы скорости горения [137]. Введение Bu-NENA в однооснов-

ное топливо привело к значительному повышению энергетики, тогда как в двух- и трехосновном топливах оно способствовало понижению чувствительности и улучшению механических свойств [138].

В [139] сообщается о разработке малочувствительного топлива UNIFLEX 2 (орудийное топливо для модульной системы заряжания), основанного на смеси FOX-12 и RDX со связующей системой из нитроцеллюлозы, пластифицированной Bu-NENA. Рабочие характеристики этого топлива соответствуют производительности одноосновного топлива, но температура пламени составляет всего 2200 К. Была приготовлена и охарактеризована серия прогрессивно горящих послонных зарядов, содержащих Bu-NENA и дибутилфталат (DBP). Показано [140], что при использовании послонного топлива кинетическая энергия возрастает на 15 %. Высокоэффективной оказалась композиция пластических ВВ с системой связующих, состоящей из Bu-NENA — NBR (нитрильный каучук) и некоторых силиконовых соединений, она обладает улучшенными связующими свойствами по сравнению с композицией С-4 (90 % RDX, 10 % каучука) [141]. Предполагается, что Bu-NENA потенциально может стать заменой неэнергетического пластификатора типа диоктилфталат (DOP) в футуристическом твердом орудийном топливе [142], а также в смесевом модифицированном двухосновном топливе [143]. Вычислительные и экспериментальные исследования выявили большой потенциал Bu-NENA в проектировании и изготовлении малоуязвимых малочувствительных топлив [144].

2.2. Тринитрат 1,2,4-бутанетриола (ВТТН)

ВТТН используется в качестве компонента ракетного топлива практически во всех одноступенчатых ракетах США, включая Hellfire. Он менее летучий, менее чувствительный к удару и более термически стабильный, чем нитроглицерин, которому он является перспективной заменой. ВТТН производится нитрованием 1,2,4-бутанетриола (ВТ). В NEMRL (Индия) разработан лабораторный синтез ВТ из коммерчески доступного исходного соединения, сейчас осуществляется процесс масштабирования его производства. Кроме того, в NEMRL исследуется биотехническое производство ВТ с использованием ферментов в

качестве катализатора для повышения экономичности процесса и уменьшения количества сточных вод.

Был изучен ряд составов для малоуязвимых боеприпасов, состоящих из окислителя (НМХ или RDX) и пластификатора ВТТН [145]. Новые составы исследовались с позиций создания твердых топлив с пониженным дымообразованием и высокой скоростью горения, а также соответствия требованиям малочувствительности боеприпасов для высокоскоростных ракет наземного и воздушного базирования [146]. Для изготовления пластических ВВ оценивались возможности композиций АFX-231 и АFX-235, которые характеризуются легкостью обработки и высокой прочностью на растяжение благодаря наличию ВТТН в их составе [147]. В целях достижения более высокой скорости горения ракетных топлив было изготовлено несколько составов с ВТТН и энергетическими твердыми окислителями, такими как AP или CL-20 [148]. Топлива на основе AP/CL-20/GAP, содержащие только 20 % AP и энергетические пластификаторы на основе ВТТН/ТМЕТН/GAP-A (глицидилазидный пластификатор с концевой азидной группой), сравнимы по характеристикам с традиционным смесевым топливом с пониженным образованием дыма на основе AP/НТРВ с содержанием 86 % AP. Топлива на основе AP/CL-20/GAP обеспечивают значительно меньшую заметность продуктов сгорания по классификации сигнатур АВ AGARD, имеют высокий удельный импульс и хорошие химические и механические свойства [149]. Было исследовано несколько высокоэнергетических составов, в которых главными компонентами являются связующее GAP (42 ÷ 47 %), ε-CL-20 (20 %), AP и энергетические пластификаторы ВТТН, GAP-A и ТМЕТН. Старение и термическое разложение ВТТН подробно обсуждаются в [150]. Изучалось влияние старения под контролем влажности на термическое разложение NC/NG/ВТТН/RDX-топлива [151]. Было исследовано быстрогорящее твердое топливо, содержащее ВТТН в качестве пластификатора и наноалюминий. Обнаружена лучшая смешиваемость с наноалюминием, чем у пластификатора нитроглицерин [152]. Кинетику и механические свойства топлива, содержащего пластифицированный азотнокислый полиэфир (NEPE) и ВТТН в качестве пластификаторов в присутствии стабилизаторов, изу-

чали при различной температуре. Определены средние коэффициенты диффузии в диапазоне $10^{-19} \div 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ [153]. Недавно сообщалось об экспериментальных результатах по изучению ударной, фрикционной, тепловой, искровой и ударно-волновой чувствительности высокоэнергетических составов твердых ракетных топлив на основе пластифицированного азотнокислого эфира, связующего и твердых компонентов, таких как AP, Al и HMX [154].

2.3. Тринитрат триметилолэтана (TMETN)

При нитровании триметилолэтана (TME) можно получить жидкий азотнокислый эфир TMETN, обладающий уникальными свойствами для использования в составах ВВ и ракетных топлив. В промышленном масштабе способ получения TMETN заключается в прямом добавлении раствора TME в серной кислоте к 97%-й азотной кислоте или к смеси азотной и серной кислот. Лабораторный способ получения TMETN с использованием смеси с азотной кислотой был разработан в NEMRL. TMETN обладает высокой скоростью детонации и низкой чувствительностью к удару. По сравнению с нитроглицерином, TMETN имеет более низкую температуру замерзания и не вызывает головной боли. Введение TMETN в состав ВВ приводит к улучшению таких свойств, как водостойкость, пластичность, скорость детонации, температурная стабильность, электростатическая чувствительность и механическая прочность.

Высокая скорость детонации и низкая чувствительность к удару позволяют вводить TMETN во взрывчатые составы для повышения мощности взрыва с незначительным влиянием на чувствительность к детонации [155]. TMETN может быть использован для пластификации связующих веществ, содержащихся в композициях ракетного топлива, и для замены компонентов с дефицитом кислорода [156]. Поскольку TMETN — компонент энергетический, общее энергетическое содержание топлива увеличивается. Разработано ракетное топливо с медленным «чистым» горением, используемое в качестве источника энергии для вспомогательных устройств на управляемых ракетных снарядах, а также ракетное топливо на основе ацетата целлюлозы с TMETN в качестве энергетического пластификатора [157]. TMETN, пластифицированный

пентаэритритол-тринитрат-акрилатным сополимерным связующим, использовали в высокоэнергетических, с большим содержанием твердых веществ, малочувствительных составах ракетного топлива [158], а также в высокоэнергетическом, с низкой скоростью горения, двухосновном топливе, содержащем HMX [159]. Последнее предназначено для использования на верхних ступенях больших твердотопливных ракет. Введение алюминиевых хлопьев в состав композиции нитрат аммония (AN) / TMETN увеличивает скорость детонации [160].

Малочувствительные литьевые пластиковые ВВ, приготовленные растворением связующих с расплавленным TNT и пластификатором, выбранным из DEGDN, TMETN, BDNPA/F, показали низкую чувствительность и хорошие механические свойства [161]. Были также исследованы смесевые топлива, содержащие GAP/AN с TMETN [162]. Изучение термодинамической совместимости TMETN с различными синтетическими полимерами показало наивысшую совместимость TMETN со связующими [163]. Малочувствительные, с усиленным взрывным эффектом формованные порошки получали путем суспендирования энергетических твердых веществ и порошковых металлов в объемной жидкой фазе, добавляя полимерные связующие и пластификаторы; проведена оценка их эффективности [164]. Последние публикации показывают, что полифункциональные алкины являются потенциальными, не содержащими изоцианат, отверждающими агентами для азидополимеров, например GAP, при наличии TMETN в качестве пластификатора, посредством термоазидно-алкинового циклоприсоединения и последующего сшивания триазола [165].

2.4. Триэтиленгликольдинитрат (TEGDN)

TEGDN — нитрованный эфир триэтиленгликоля, бледно-желтая маслянистая жидкость, несколько напоминающая нитроглицерин. Он используется в качестве энергетического пластификатора в малочувствительных ВВ и ракетных топливах и рассматривается в качестве замены нитроглицерину. Компания EURENCO Vihtavuori Oy (Финляндия) имеет производственные мощности для безопасного производства TEGDN [166]. Одним из многих преимуществ TEGDN является его малая чувствительность к детонации. TEGDN

также превосходит нитроглицерин по способности выдерживать низкую температуру. Химическая и термическая устойчивость, хорошая устойчивость к удару и трению делают TEGDN перспективным компонентом, позволяющим уменьшить чувствительность основанного на нитроцеллюлозе топлива. TEGDN применяется в качестве энергетического пластификатора в топливах и литевых малочувствительных энергетических композициях [167], а также в составах твердого топлива, используемых в орудиях, ракетах, ракетах с воздушным пуском, в управляемых реактивных снарядах, наземных перехватчиках и космических ускорителях. Компания EURENCO провела испытания TEGDN в качестве компонента многоосновного ракетного топлива, результаты оказались многообещающими [168, 169].

2.5. Бисдинитропилформаль/ацеталь (BDNPF/A)

Бис(2,2-динитропил)ацеталь (BDNPA) — энергетический пластификатор, используемый в ракетных топливах и взрывчатых композициях. BDNPA часто комбинируют с более энергетическим и химически подобным бис(2,2-динитропропил)формалем (BDNPF) в соотношении 50 : 50. Смесь известна под обозначением BDNPF/A. В то время как BDNPF при комнатной температуре — твердое вещество, смесь его с BDNPA — жидкость. Смесь BDNPA/BDNPF является коммерческим продуктом. Соединение BDNPF/A синтезируют взаимодействием 2,2-динитропропанола (DNP) и формальдегида/ацетальдегида [170]. В NEMRL (Индия) разработан лабораторный метод получения этого вещества и передано технологическое ноу-хау для его промышленного производства на уровне 2 кг/партия.

Исследовательский центр армии США (TACOM-ARDEC) признал выгодным использование энергетического пластификатора BDNPA/F во взрывчатых композициях [171]. Топлива на основе AP/GAP/BDNPF/A характеризуются равномерным горением и пониженным показателем в законе скорости горения $n \leq 0.4$ при высоком давлении (15 ÷ 25 МПа). Кроме того, такие топлива обладают хорошей химической стабильностью и, несмотря на высокое содержание ультрамелкого AP, достаточно низкой механической чувствительностью [172]. Ранее в NEMRL были разработаны смесевые модифицированные двухосновные (CMDB) топлива на основе

RDX/AP с пластификатором BDNPA/F. Результаты [173] показывают, что добавление BDNPF/A привело к общему увеличению скорости горения на 9 ÷ 46 %, а также к увеличению удельного импульса по сравнению с составом с обычным пластификатором диэтилфталатом (DEP). Основанные на CL-20 алюминизированные смесевые модифицированные топлива превосходят по скорости горения топлива, содержащие RDX, и менее чувствительны к трению, чем композиции типа AP—CMDB. Использование вместо DEP низкомолекулярных GAP и BDNPF/A в качестве сопластификаторов нитроглицерина привело к заметному увеличению скорости горения и удельного импульса [174]. Разработаны высокоэнергетические смесевые топлива с пониженным дымообразованием, содержащие двух- и тримодальные фракции AP, до 12 % RDX, сополимеры GAP/BAМО и BDNPF/A в качестве пластификатора. Эти топлива отличаются высокими термодинамическими характеристиками, удельным импульсом до 2500 Н/кг при 7 МПа и низкой температурой стеклования [175]. Раскрыт состав алюминизированной взрывчатой композиции, содержащей BDNPA/F, который используется для создания высокоэффективного мощного малочувствительного ВВ [176]. Состав поддается прессованию и/или смешению, что может обеспечить образование гранул, пригодных для производства боеприпасов, а также для аналогичных применений в гранатах, боеголовках, наземные минах и т. д.

2.6. 2,4-динитро-2,4-диазапентан (DNDA-57)

Обычные топлива на основе нитроклетчатки содержат в составе нитроглицерин в качестве гелеобразующего агента и пластификаторы типа дибутилфталат или диоктиладипат в качестве дополнительных ингредиентов, повышающих гибкость. Сообщалось о термических и взрывчатых свойствах соединений DNDA-5, DNDA-6, DNDA-7 и некоторых бинарных и тройных смесей этих компонентов. Из перечисленных образцов самую низкую температуру стеклования имеет чистый компонент DNDA-6 — около -60 °С [177]. Энергетическая пластифицирующая смесь DNDA-57 (содержащая 2,4-динитро-2,4-диазапентан DNDA-5, гексан DNDA-6 и гептан DNDA-7) позволяет создать топлива,

обладающие лучшими механическими свойствами и низким температурным коэффициентом.

Термические нагрузки содержащего DNDA ракетного топлива и полученные в результате их воздействия баллистические, механические и химические свойства описаны в [178]. Новый тип нитраминсодержащих оружейных топлив (NT—GP), имеющих в составе кристаллический RDX либо FOX-7 и DNDA в качестве пластификатора, а также нитроцеллюлозу в качестве связующего, демонстрирует улучшение таких характеристик, как термочувствительность, отклик на воздействие струи кумулятивного заряда, сила пороха и эрозия ствола [179]. Характер горения нитраминных оружейных топлив, содержащих кристаллы DNDA различных фракций, под воздействием колебаний давления описан в [180]. Были изучены высокоэффективные взрывчатые составы, состоящие из RDX или PETN и связующих Bu-NENA, DNDA-5 ÷ 7 или силикон. Эти композиции обладают лучшими адгезионными и формовочными свойствами по сравнению с композицией С-4. При этом запас энергии в них значительно выше [181]. Недавно были приготовлены модифицированные литьевые двухосновные топлива, включающие в себя Bu-NENA и DNDA-57 в качестве энергетических пластификаторов и RDX с различным содержанием. Результаты исследований показали, что композиция с комбинированным пластификатором имеет самую высокую скорость горения и самую низкую чувствительность к ударному воздействию [182].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре кратко описаны энергетические материалы, относящиеся к классам твердых взрывчатых веществ, связующих и пластификаторов, а также производственные возможности их изготовления по всему миру, включая Индию, соответствующие требованиям к изготовлению футуристических малочувствительных составов для боеприпасов. Соединения, перечисленные в настоящем обзоре, характеризуются не только улучшенной эффективностью, но и отвечают критериям и концепциям создания малочувствительных боеприпасов. Литьевые (серии AFX) и прессуемые малочувствительные составы с высокоэнергетическими взрывчатыми веществами, содер-

жащие NTO, показали улучшенные рабочие характеристики и прошли все испытания серии HD 1.6 в бомбах общего назначения Mk-82, подводных взрывных зарядах, кумулятивных зарядах и боеприпасах среднего калибра. В результате испытаний обнаружено, что некоторые малочувствительные составы пластических ВВ, ракетные топлива и газогенерирующие составы на основе FOX-7 и FOX-12 имеют пониженную чувствительность по сравнению с Comp B. Энергетические малочувствительные топливные составы для орудий, основанные на FOX-7 и FOX-12, демонстрируют более низкую температуру пламени, надежные рабочие характеристики и экологичность в сочетании с улучшенными механическими свойствами. Во многих странах предпринимаются попытки использования CL-20 в энергетических составах для систем вооружения. Разработано множество композиций с CL-20, некоторые из них нашли применение в перспективных миниатюризированных оружейных системах. Сообщается, что некоторые составы пластических ВВ, содержащие RS-RDX, характеризуются малочувствительным ударно-волновым поведением. Дальнейшие усилия фокусируются на разработке RS-RDX с желаемыми формой и размерами зерен с тем, чтобы применять их в улучшенных малочувствительных топливах и взрывчатых составах. Другой перспективный материал — MTNI, его считают отличным кандидатом для включения в состав литьевых взрывчатых веществ, он способен увеличить мощность взрыва по сравнению с композициями на основе TNT. Усилия сосредоточены на разработке альтернативных путей малозатратного массового производства MTNI. Хорошо изучен такой ингредиент, как DNAN, в качестве замены им TNT в литьевых составах с более высоким содержанием твердого вещества. Для замены токсичных композиций на основе TNT в артиллерийских снарядах разработан ряд высокоэффективных малочувствительных литьевых взрывчатых веществ (IMX/PAX) (как альтернатива Comp B).

Ведутся работы по созданию малочувствительных композиций на основе энергетических материалов следующего поколения, таких как TEX, LLM-105, ADNBF, DAAF и 2,4-DNI, и ожидается, что эти работы будут продолжены. Однако следует иметь в виду, что начальная стоимость МВ-композиций, основанных на современных энергетических матери-

алах, вероятно, будет выше по сравнению со стоимостью обычных энергетических материалов. В различных исследовательских лабораториях по всему миру предпринимаются усилия по снижению стоимости современных энергетических материалов, тогда, вероятно, удастся снизить и стоимость малочувствительных составов. Энергетические полимеры, такие как GAP, PLN, PGN и ВАМО/АММО, и энергетические пластификаторы, такие как Bu-NENA, BTTN, ТМЕТN, BDNPF/A и DNDA-57, продемонстрировали свою замечательную полезность в разработке МБ-композиций. Таким образом, разработка названных композиций для МБ и создание местных производств как для ингредиентов, так и для конечной продукции — это потребность сегодняшнего дня, чтобы соответствовать требованиям специализированных стратегических программ. Авторы твердо убеждены в том, что данный обзор будет полезен исследователям, ученым, технологам и инженерам, занятым изучением энергетических материалов, в их будущей исследовательской и опытно-конструкторской работе по созданию перспективных композиций. Авторы осветили некоторые недавно опубликованные научные исследования в области малочувствительных взрывчатых веществ и топливных составов. Будущее в области исследования энергетических материалов представляется многообещающим, и авторы надеются, что все больше сведений о новых мощных и малоуязвимых компонентах топлив и взрывчатых веществ появится в литературе.

Мы благодарим директора НЕМRL за решение опубликовать эту статью. Авторы также выражают признательность помощнику директора д-ру А. К. Сикдеру (в отставке) за мотивацию и поощрение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Doherty R., Simpson R. L.** A comparative evaluation of several insensitive high explosives // 28th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1997. — P. 32.1–32.23.
2. **Alouaamari M., Lefebvre M. H., Perneel Ch., Herrmann M.** Statistical assessment methods for the sensitivity of energetic materials // Propell., Explos., Pyrotech. — 2008. — V. 33, N 1. — P. 60–65.
3. **Agrawal J. P.** High Energy Materials. — Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2010.
4. **Sikder A. K., Sikder N.** A review of advanced high performance, insensitive and thermally stable energetic materials emerging for military and space applications // J. Hazard. Mater. — 2004. — V. 112, N 1-2. — P. 1–15.
5. **Pagoria P. F., Lee G. S., Mitchell A. R., Schmidt R. D.** A review of energetic materials synthesis // Thermochim. Acta. — 2002. — V. 384. — P. 187–204.
6. **Талавар М. Б., Сивабалан Р., Аннияппан М., Горе Г. М., Астана С. Н., Гандхе Б. Р.** Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 72–85.
7. **Badgujar D. M., Talawar M. B., Mahulikar P. P.** Review of promising insensitive energetic materials // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2017. — V. 14, N 4. — P. 821–843.
8. **Vijayalakshmi R., Radhakrishnan S., Patil R. S., Gore G. M., Sikder A. K.** Particle size management studies on spherical 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one // Part. Part. Syst. Charact. — 2011. — V. 28. — P. 57–63.
9. **Aubert S. A., Corley J. D., Glenn J. G.** Development of TNTO composite explosives // WL-TR-92-7073. — Wright Laboratory, Eglin Air Force Base, Florida, USA, 1993.
10. **Corley J. D., Stewart A. C.** Fuzed insensitive general purpose bomb containing AFX-645 // Proc. Int. Symp. on Energ. Mater. Technol. (Phoenix, September 24–27, 1995). — 1995. — P. 98–103. — (American Defence Preparedness Association; N 680).
11. **Kosowski B. M., Taylor R. C.** New processing aid and emulsifier for energetics // 27th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1996. — P. 152(1)–152(11).
12. **Sumrall T. S., Niceville F. L.** Large scale thermal sensitivity results of a melt castable general purpose insensitive high explosive // Proc. 23rd Int. Pyrotech. Seminar. — 1997. — P. 822–846.
13. **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 Energ. Mater. Technol. Symp., Florida, USA. — 1997. — (National Defense Industrial Association, Event; N 854).
14. **Cumming A. S., Gaulter S. E., Leach C. J.** The formulation of an insensitive high explosive based on HMX, NTO and PolyNIMMO // Insensitive Munitions Technol. Symp., Virginia, USA. — 1994. — P. 376–382. — (American Defense Preparedness Association; N 471).
15. **Leach C. J., Garaty B. J., Cox K. J.** Progress in aluminized IHE // Technical Panel W-4. Energ. Mater. and Propul. Technol., 22nd Meeting, United Kingdom. — 1997. — P. 1–8.
16. **Mukundan T., Nair J. K., Purandare G. N., Talawar M. B., Nath T., Asthana S. N.** Low vulnerable sheet explosive based on 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one // J. Propul. Power. — 2006. — V. 22, N 6. — P. 1348–1352.

17. **Coulouarn C., Lamy-Bracq P., Bulot S.** Development of a new pressable XP[®] explosive composition for medium caliber 656 // Proc. Int. Pyrotech. Seminar, 37th EUROPYRO. — 2011. — P. 54–62.
18. **Trzciński W. A., Cudziło S., Dyjak S., Nita M.** A comparison of sensitivity and performance characteristics of melt-pour explosives with TNT and DNAN binder // New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. 15th Seminar, Pardubice, Czech Republic. — 2012. — V. 2. — P. 893–901.
19. **Radhakrishnan S., Vijayalakshmi R., Reddy T. S., Patil R. S., Gore G. M., Sikder A. K.** Effect of particle size and shape of NTO on micromeritic characteristics and its explosive formulations // Powder Technol. — 2014. — V. 253. — P. 276–283.
20. **Vijayalakshmi R., Radhakrishnan S., Shitole Pooja, Pawar S. J., Mishra V. S., Garg R. K., Talawar M. B., Sikder A. K.** Spherical 3-nitro-1,2,4-triazol-5-one (NTO) based melt-cast compositions: heralding a new era of shock insensitive energetic materials // RSC Adv. — 2015. — V. 5. — P. 101647–101655.
21. **Nicolich S., Niles J., Doll D., Ray M., Gunger M., Spencer A.** Development of a novel high fragmentation/high blast melt pour explosive // Insensitive Munitions and Energ. Mater. Technol. Symp. (IMEMTS 2003), USA. — 2003.
22. **Barrie A.** Bye bye, TNT: New generation of explosives for the Army. — Fox News, from Online (2013-03-26).
23. **Fung V.** Process improvement and optimization of insensitive explosive IMX-101 // Insensitive Munitions and Energ. Mater. Technol. Symp., U.S. Army (S2DSEA2012-0148). — 2012.
24. **Östmark H., Langlet A., Bergman H., Wingborg N., Wellmar U., Bemm U.** FOX-7 — a new explosive with low sensitivity and high performance // The 11th Int. Detonation Symp., Colorado, USA, 1998.
25. **Sorescu D. C., Boatz J. A., Thompson D. L.** Classical and quantum-mechanical studies of crystalline FOX-7 (1,1-diamino-2,2-dinitroethylene) // J. Phys. Chem. A. — 2001. — V. 105, N 20. — P. 5010–5021.
26. **Ostmark H., Bergman H., Bemm U., Goede P., Holmgren E., Johansson M., Langlet A., Latypov N. V., Pettersson A., Pettersson M.-L., Wingborg N., Vorde C., Stenmark H., Karlsson L., Hihkio M.** 2,2-Dinitro-ethene-1,1-diamine. Properties, analysis and scale up // 32nd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2001. — P. 26.1–26.21.
27. **Latypov N. V., Bergman J., Langlet A., Wellmar U., Bemm U.** Synthesis and reactions of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene // Tetrahedron. — 1998. — V. 54, N 38. — P. 11525–11536.
28. **Anniyappan M., Talawar M. B., Gore G. M., Venugopalan S., Gandhe B. R.** Synthesis, characterization and thermolysis of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (FOX-7) and its salts // J. Hazard. Mater. — 2006. — V. 137, N 2. — P. 812–819.
29. **Eldsaeter C., Edvinsson H., Johansson M., Pettersson A., Sandberg C.** Formulation of PBX's based on 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene (FOX-7) // 33rd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, 2002. — P. 63.1–63.14.
30. **Kretschmer A., Gerber P., Happ A.** Characterization of plastic bonded explosive charges containing FOX-7 // 35th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, 2004. — P. 172.1–172.11.
31. **Orzechowski A., Powała D., Maranda A., Florczak B.** 1,1-Diamino-2,2-dinitroethylene as a component of plastic bonded explosives // New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. of 10th Seminar, Pardubice, Czech Republic. — 2007. — P. 825–830.
32. **Powała D., Orzechowski A., Papliński A., Maranda A.** Some properties of PBX containing FOX-7 // New Trends in Research of Energ. Mater.: Proc. of 12th Seminar, Pardubice, Czech Republic. — 2009. — P. 781–786.
33. **Blomquist H. R.** Reduced smoke gas generant with improved mechanical stability: US Pat. 6,113,713 A. — Sep. 5, 2000.
34. **Vörde C., Röstlund S., Sjöqvist C., Klaw Å.** Development of a moisture insensitive gas generating composition // 38th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2007. — P. 11.1–11.7.
35. **Collet C., Le Roux B., Mahe B., Nouguez B.** FOX-7 based insensitive cast PBX // IMEMTS. — May 11–14, 2009.
36. **Müller D., Langlotz W.** Treibladung: Eur. Pat. Appl. EP 2388244 A1. — Nov. 23, 2011.
37. **Trzciński W. A., Cudziło S., Chyłek Z., Szymańczyk L.** Detonation properties and thermal behavior of FOX-7-based explosives // J. Energ. Mater. — 2013. — V. 31, N 1. — P. 72–85.
38. **Golding P., Ridpath I., Wanhatalo M., Rittums J. E., Oscarson C. E. I.** Formulation and initial characterisation of a FOX-7 polyphosphazene based PBX // 43rd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2012. — P. 2.1–2.12.
39. **Lips H., Helou S., Kentgens H., Menke K., Barilla A., Eisele S.** Less sensitive smoke reduced rocket propellants based on FOX 7 // 43rd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2012. — P. 22.1–22.11.
40. **Lim J. H., Byun G. M.** Eco-friendly propellant composition with excellent reliability, and method for manufacturing propellant: Repub. Korean Kongkae Taeho Kongbo, KR Pat. 2,012.137.643 A. — Dec. 24, 2012.

41. **Конашенков А. И., Спорыхин А. И., Вареных Н. М., Воронков С. И., Закамский О. В.** Взрывчатая композиция повышенной мощности: Пат. RU 2485079 C1. — 20 июня, 2013.
42. **Naumann K.-W., Schmid K., Ramsel J., Stierle R.** Gel-form fuel: Eur. Pat. DE 102011056581 7A, EP 2607337 A1. — Jun. 26, 2013.
43. **Mishra V. S., Vadali S. R., Garg R. K., Joshi V. S., Wasnik R. D., Rajbal D., Asthana S. N.** Studies on FOX-7 based melt cast high explosive formulations // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2013. — V. 10. — P. 569–580.
44. **Belaada A., Trzciński W. A., Chyłek Z., Szala M., Paszula J.** A melt-cast composition based on NTO and FOX-7 // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 4. — P. 882–902.
45. **Mishra V. S., Vadali S. R., Bhagat A. L., Garg R. K., Kugaonkar V. M., Raman S., Sinha R. K., Asthana S. N.** Studies on NTO-, FOX-7- and DNAN-based melt cast formulations // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 14, N 2. — P. 1–15.
46. **Trzciński W. A., Belaada A.** 1,1-Diamino-2,2-dinitroethene (DADNE, FOX-7) — properties and formulations (a Review) // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 2. — P. 527–544.
47. **Elsharkawy K. A., Lin G.** 1,1-Diamino-2,2-dinitroethene (FOX-7) based sheet explosive material with glycidyl azide polymer in comparison with RDX based system // *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. — 2017. — V. 6, N 12.
48. **Dahiwale S. M., Bhongale C., Asthana S. N.** Ballistic studies on Fox-7 based triple base propellant for high calibre gun // *Academ. J. Polym. Sci.* — 2019. — V. 2, N 4. — DOI: 10.19080/AJOP.2019.02.555593.
49. **Langlet A., Östmark H., Wingborg N.** Method of preparing dinitramidic acid and salts thereof: *Int. Pat. WO 1997006099 A1*. — Feb. 20, 1997.
50. **Ostmark H., Langlet A., Bergman H., Wingborg N., Wellmar U., Bemm U.** FOX-7— A new explosive with low sensitivity and high performance // *Proc. of the 11th Int. Detonation Symp.*, 1998. — 2000. — P. 807. — (Office of Naval Research, Arlington, VA; ONR 33300-5).
51. **Blomquist H. R.** Gas generating composition comprising guanylurea dinitramide: *US Pat. 6.117.255 A*. — Sep. 12, 2000.
52. **Persson S., Sjöqvist C.** Composite gas-generating material for gas-actuated car safety devices: *Pat. WO 2.000.069.792*. — May 4, 2000.
53. **Pang J., Wang J., Zhang R., Xie B.** Application of CL-20, FOX-12 and DNTF in CMDB propellant // *Houshayao Xuebao*. — 2005. — V. 28. — P. 19–21. — (Chinese).
54. **Östmark H., Bemm U., Bergman H., Langlet A.** N-guanylurea-dinitramide: a new energetic material with low sensitivity for propellants and explosives applications // *Termochim. Acta*. — 2002. — V. 384, N 1-2. — P. 253–259.
55. **Östmark H., Bemm U., Langlet A., Sandén R., Wingborg N.** The properties of ammonium dinitramide (ADN): Part 1. Basic properties and spectroscopic data // *J. Energ. Mater.* — 2000. — V. 18. — P. 123.
56. **Mueller D.** Insensitive gun propellants with low temperature coefficient based on DND // *35th Proc. Int. Pyrotech. Seminar*. — 2008. — P. 539–545. — (IPSUSA Seminars, Inc.).
57. **Badgujar D., Talawar M.** Thermal analysis and sensitivity studies on guanylurea dinitramide (GUDN or FOX-12) based melt cast explosive formulations // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 14, N 2. — P. 296–303.
58. **Nielsen A. T., Chaafin A. P., Chriostian S. L.** Synthesis of polyazapolycyclic caged polynitramines // *Tetrahedron*. — 1998. — V. 54. — P. 11793–11812.
59. **Braithwaite P. C., Hatch R. L., Lee K., Wardle R. B.** Development of high performance CL-20 explosive formulations // *29th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1998*. — P. 4.1–4.7.
60. **Golfier M., Graindorge H., Longevialle Y., Maee H.** New energetic molecules and their applications in energetic materials // *29th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1998*. — P. 3.1–3.18.
61. **Сысолятин С. В., Лобанова А. А., Черникова Ю. Т., Сакович Г. В.** Методы синтеза и свойства гексанитрогексаазазовюрцитана // *Успехи химии*. — 2005. — Т. 74, № 8. — С. 830–838.
62. **Wardle R. B., Edwards W. W.** Improved hydrogenolysis of 2,4,6,8,10,12-hexabenzyl-2,4,6,8,10,12-hexaazatetracyclo [5.5.0.0^{5,9}.0^{3,11}]dodecane: *Pat. WO 1997020785 A1*. — Jun. 12, 1997.
63. **Agrawal J. P.** Some new high energy materials and their formulations for specialized applications // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2005. — V. 30, N 5. — P. 316–328.
64. **Наир У. Р., Сивабалан Р., Горе Г. М., Гиза М., Астана С. Н., Сингх Х.** Гексанитрогексаазазовюрцитан (CL-20) и составы на его основе (обзор) // *Физика горения и взрыва*. — 2005. — Т. 41, № 2. — С. 3–16.
65. **Lee K. E., Hatch R. L., Braithwaite P.** Method for making high performance explosive formulations containing CL-20: *US Pat. 6.217.799 B1*. — Apr. 17, 2001.
66. **Bircher S. R., Mader P., Mathieu J.** Properties of CL-20 based high explosives // *29th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1998*. — P. 94.1–94.14.

67. **Chan M. L., Turner A. D.** Preparation of fine particulate CL-20: US Pat. 5.712.511 A. — Jan. 27, 1998.
68. **Thiboutot S., Brousseau P., Ampleman G., Pantea D., Côté S.** Potential use of CL-20 in TNT/ETPE-based melt cast formulations // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2008. — V. 33. — P. 103.
69. **Singh S., Kwok Q. S. M., Badeen C. M., Acheson B., Turcotte R., Brousseau P.** Compatibility of CL-20 with TNT and GAP-based ETPE // 38th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2007. — P. 131.1.
70. **Mezger M. J., Nicolich S. M., Geiss D. A., Hatch R. L., Lee K. E.** Performance and hazard characterization of CL-20 formulations // 30th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1999. — P. 4.1-4.14.
71. **Mueller D.** New gun propellant with CL-20 // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1999. — V. 24, N 3. — P. 176–181.
72. **Wardle R. B., Braithwaite P. C., Haaland A. C., Hartwell J. A., Hendrickson R. R., Lott V., Wallace I. A., Zisette C. B.** High energy oxetane/HNIW gun propellant // 27th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1996. — P. 52.1–52.7.
73. **Nair U. R., Gore G. M., Sivabalan R., Divekar C. N., Asthana S. N., Singh H.** Studies on advanced CL-20 based composite modified double-base propellants // *J. Propul. Power.* — 2004. — V. 20. — P. 952–955.
74. **Chan M. L., Bui D. T., Meyers G., Turner A.** Castable thermobaric explosive formulations: US Pat. 6.969.434 B1. — Nov. 29, 2005.
75. **Nicolich S. M., Capellos C., Balas W. A., Akester J. D., Hatch R. L.** High-blast explosive compositions containing particulate metal: US Pat. 8.168.016 B1. — May 1, 2012.
76. **Андреевских Л. А., Вахмистров С. А., Сви́рский О. В., Фомичева Л. В., Шейков Ю. В.** Смесевое взрывчатое вещество и способ его изготовления: Пат. RU 2417971 C1. — 10 мая, 2011.
77. **Dumas S., Gauvrit J. Y., Lanteri P.** Determining the polymorphic purity of ϵ -CL-20 contaminated by other polymorphs through the use of FTIR spectroscopy with PLS Regression // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37. — P. 230–234.
78. **Ghosh M., Venkatesan V., Snehal M., Banerjee S., Sikder N., Sikder A. K., Bhat-tacharya B.** Probing crystal growth of ϵ - and α -CL-20 polymorphs via metastable phase transition using microscopy and vibrational spectroscopy of CL-20 // *Cryst. Growth Des.* — 2014. — V. 14. — P. 5053–5063.
79. **Wei Y., Wang J., An C.-W., Li H., Wen X., Yu B.** GAP/CL-20-based compound explosive: a new booster formulation used in a small-sized initiation network // *J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 35. — P. 53–62.
80. **Jangid S. K., Talawar M. B., Singh M. K., Nath T., Sinha R. K.** Experimental studies on advanced sheet explosive formulations based on 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane (CL-20) and hydroxyl terminated polybutadiene (HTPB), and comparison with a RDX-based system // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 1. — P. 135–147.
81. **Ramakrishnan V. T., Vedachalam M., Boyer J. H.** 4,10-Dinitro-2,6,8,12-tetraoxa-4,10-diazatetracyclo[5.5.0.0^{5,9}.0^{3,11}]dodecane // *Heterocycles.* — 1990. — V. 31. — P. 479–480.
82. **Bayat Ya., Azizkhani V.** Synthesis of 4,10-dinitro-2,6,8,12-tetraoxa-4,10-diazaisowurtzitane (TEX) using heteropolyacids as efficient and recyclable heterogeneous catalysts // *J. Energ. Mater.* — 2012. — V. 30. — P. 209–219.
83. **Maksimowski P., Golofit T.** 4,10-Dinitro-2,6,8,12-tetraoxa-4,10-diazatetracyclo[5.5.0.0^{5,9}.0^{3,11}]dodecane synthesis // *J. Energ. Mater.* — 2013. — V. 31, N 3. — P. 224–237.
84. **Koch E.-Ch.** Weapon for selective causation of a detonation or deflagration: Eur. Pat. EP 2151422 A2. — Feb. 10, 2010.
85. **Martins L. J., Cragun R. B., Lund G. K., Wells M. V., Mancini V. E.** Method of making multi-base propellants from pelletized nitrocellulose: US Pat. 6.692.655 B1. — Feb. 17, 2004.
86. **McKenney R. L., Jr., Leahy J. F., Parkin S. T., Krawietz T. R.** Plasticized, wax-based binder system for melt castable explosives: US Pat. 6.641.683 B1. — Nov. 04, 2003.
87. **Lewis D. J., Olander D. E., Magenot M. C.** Gas generating device: Pat. WO 2002022214 A2. — Mar. 21, 2002.
88. **Braithwaite P. C., Lund G. K., Wardle R. B.** High performance pressable explosive compositions: US Pat. 5.587.553 A. — Dec. 24, 1996.
89. **Wallace I. A., II, Braithwaite P. C., Neidert J. B.** Plastisol explosive: US Pat. 5.468.313 A. — Nov. 21, 1995.
90. **Doll D. W., Hanks J. M., Highsmith T. K., Lund G. K.** Reduced sensitivity melt-cast explosives: Pat. WO 2001046092 A1. — Jun. 28, 2001.
91. **Deshmukh M. B., Borse A. U., Mahulikar P. P., Dalal D. S.** An improved and scalable synthesis of insensitive high explosive 4,10-dinitro-2,6,8,12-tetraoxa-4,10-diazaisowurtzitane (TEX) // *Org. Process Res. Dev.* — 2016. — V. 20, N 7. — P. 1363–1369.
92. **Matsuzaki S., Yano E., Suzuki S., Suzuki Y., Hasegawa T., Kato Y.** Reduced sensitivity RDX (RS-RDX): Effects of crystal quality and shape on the shock sensitivity of RS-RDX based PBXN-109 formulation // *Proc. of 38th*

- Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2007. — P. 130/1–130/10.
93. **Johansen O. H., Kristiansen J. D., Gjersoe R., Berg A., Halvorsen T., Smith K.-T., Nevstad G. O.** RDX and HMX with reduced sensitivity towards shock initiation — RS-RDX and RS-HMX // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2008. — V. 33, N 1. — P. 20–24.
94. **Van der Heijden A. E. D. M., Creighton Y. L. M., Marino E., Bouma R. H. B., Scholtes G. J. H. G., Duvalois W., Roelands M. C. P. M.** Energetic materials: crystallization, characterization and insensitive plastic bonded explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2008. — V. 33. — P. 25–32.
95. **Hudson R., Gill P. P., Flower P. Q., Cumming A. S.** Assessment of RDX crystal morphology and defects // 41st Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2010. — P. 73.1–73.15.
96. **Matsuzaki S., Suzuki S., Suzuki Y., Kato Y.** Effect of crystal quality of fine RDX particle on the shock sensitivity of cast cured PBX formulation based on RS-RDX // 39th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2008. — P. 102.1–102.9.
97. **Matsuzaki S., Fujigaki Yu., Kato Yu.** Aging evaluations of RS-RDX and PBX formulations based on RS-RDX // 40th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2009. — P. 76.1–76.7.
98. **Plaksin I., Gois J., Campos J., Rodrigues L., Plaksin S., Mendes R., Ribeiro J.** Effect of aluminum additives and the RDX crystal quality on the scale of localizations/cellular structure of the detonation reaction zone: Conventional PBXs vs. RS-PBXs // 39th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2008. — P. 103.1–103.12.
99. **Hudson R. J., Gill Ph. P.** Multi-person assessment of RDX crystal morphology using the RS-RDX round robin method // *New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. of 14th Seminar, Pardubice, Czech Republic.* — 2011. — V. 1. — P. 237–245.
100. **Gerber P.** Properties of insensitive octogen // 37th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2006. — P. 51.1–51.8.
101. **Van der Heijden A. E. D. M., Bouma R. H. B.** Crystallization and characterization of RDX, HMX, and CL-20 // *Cryst. Growth Des.* — 2004. — V. 4, N 2. — P. 999–1007.
102. **Tran T. D., Pagoria P. F., Hoffman D. M., Cutting J. L., Lee R. S., Simpson R. L.** Characterization of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) as an insensitive high explosive material // 33rd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2002. — P. 45.1–45.16.
103. **Jing S., Liu Y., Liu D., Guo J.** Research on a new synthesis of LLM-105 using N-nitrosobis(cyanomethyl)amine // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 1. — P. 21–32.
104. **Pagoria Ph., Zhang M.-X., Zuckerman N., Lee G., Mitchell A., DeHope A., Gash A., Coon C., Gallagher P.** Synthetic studies of 2,6-diamino-3,5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) from discovery to multi-kilogram scale // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42. — P. 1–14.
105. **Weese R. K., Burnham A. K., Turner H. C., Tran T. D.** Exploring the physical, chemical and thermal characteristics of a new potentially insensitive high explosive RX-55-AE-5 // *J. Therm. Anal. Calorim.* — 2007. — V. 89. — P. 465–473.
106. **Cramer R. J., Peters S., Simmons R., Mitchell S.** Energetic deterrent coating for gun propellant: US Pat. 6.345.577. — Feb. 12, 2002.
107. **Yu W.-F., Liao L.-G., Chen F.-L., He M.-Zh., Tan D.-M., Fan G.-J., Hao Sh.-L., Lu H.-Ch.** Occupational toxicological characteristics of LLM-105 explosives // *Int. J. Ecotoxicol. Ecobiol.* — 2016. — V. 1, N 3. — P. 88–93.
108. **Damavarapu R., Surapaneni C. R., Gelber N., Duddu R. G., Zhang M.-X., Dave P. R.** Melt-cast explosive material: US Pat. 70304164 B1. — Dec. 4, 2007.
109. **Duddu R., Zhang M.-X., Damavarapu R., Gelber N.** Molten-state nitration of substituted imidazoles: new synthetic approaches to the novel melt-cast energetic material, 1-methyl-2,4,5-trinitroimidazole // *Synthesis.* — 2011. — V. 17. — P. 2859–2864.
110. **Su X.-F., Cheng X.-L., Meng Ch.-M., Yuan X.-L.** Quantum chemical study on nitroimidazole, polynitroimidazole and their methyl derivatives // *J. Hazard. Mater.* — 2008. — V. 161, N 1. — P. 551–558.
111. **Damavarapu R., Gelber N., Surapaneni R., Zhang M.-X., Duddu R., Dave P.** Novel melt-cast explosive material: 1-methyl-2,4,5-trinitroimidazole(MTNI) // *New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. of the 12th Seminar, Pardubice, Czech Republic.* — 2009. — Pt 1. — P. 109–114.
112. **Anniyappan M., Vijay Varma K., Amit R. S., Nair J. K.** 1-methyl-2,4,5-trinitroimidazole (MTNI), a melt-cast explosive: synthesis and studies on thermal behavior in presence of explosive ingredients // *J. Energ. Mater.* — 2020. — V. 38, N 1. — P. 111–125. — DOI: org/10.1080/07370652.2019.1669735.
113. **Fedoroff B. T., Sheffield O. E.** *Encyclopedia of Explosives and Related Items.* — Dover, N. J.: Picatinny Arsenal. — 1966. — V. 3. — P. C616.
114. **Smith M. W., Lu J. P.** Aging of the Insensitive Explosive, ARX-4024. — Edinburgh, S. Aust.: DSTO Systems Sciences Laboratory, 2004.
115. **Wöhler L., Wenzelberg I. O.** Neues zur Schlagempfindlichkeit der Explosivstoffe (New test for impact sensitivity of explosives) // *Angew. Chemie.* — 1933. — V. 46. — P. 175.

116. **Nicolich S., Niles J., Doll D., Ray M., Gunger M., Spencer A.** Development of a novel high fragmentation/high blast melt pour explosive // *Insensitive Munitions and Energ. Mater. Technol. Symp. (IMEMTS 2003), USA.* — 2003.
117. **Provatas A., Wall C.** Thermal testing of 2,4-dinitroanisole (DNAN) as a TNT replacement for melt-cast explosives // *42nd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2011.* — P. 6.1–6.12.
118. **Lent E. M., Crouse L. C., Wallace S. M.** Oral toxicity of 2,4-dinitroanisole in rats // *Int. J. Toxicol.* — 2016. — V. 35. — P. 692–711.
119. **Gobel M., Karaghiosoff K., Klapotke T. M., Piercey D. G., Stierstorfer J.** Nitrotetrazolate-2N-oxides and the strategy of N-oxide introduction // *J. Am. Chem. Soc.* — 2010. — V. 132. — P. 17216–17226.
120. **Fischer N., Fischer D., Klapotke T. M., Piercey D. G., Stierstorfer J.** Pushing the limits of energetic materials — The synthesis and characterization of dihydroxyammonium 5,50-bistetrazole-1,10-diolate // *J. Mater. Chem.* — 2012. — V. 22. — P. 20418–20422.
121. **Klapötke T. M.** *Chemistry of High-energy Materials.* — 2nd ed. — Walter de Gruyter, 2012.
122. **Nandagopal S., Singh S., Adak R. P. K., Rao N. P. N., Talawar M. B., Gupta M.** Green Energetic Material-TKX-50: Evaluation in composite propellant formulation based on HTPB/AP/Al // *47th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2016.*
123. **Huang H.-F., Shi Y.-M., Yang J.** Compatibility study of dihydroxyammonium 5,5'-bistetrazole-1,1'-diolate (TKX-50) with some energetic materials and inert materials // *J. Energ. Mater.* — 2015. — V. 33. — P. 66–72.
124. **Ma S., Li Y.-J., Li Y., Luo Y.-J.** Research on structures, mechanical properties, and mechanical responses of TKX-50 and TKX-50 based PBX with molecular dynamics // *J. Mol. Model.* — 2016. — V. 22. — P. 43.
125. **Golubev V. K., Klapötke T. M.** Comparative analysis of shock wave action of TKX-50 and some other explosives on various barriers // *New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. 17th Seminar, Pardubice, Czech Republic.* — 2014. — P. 529.
126. **Zhou M.-N., Chen Sh.-S., Wang D.-X., Yu Y.-H., Wang J.-Q., Li J.-X., Wang N., Chen M.-L.** A comparative study of performance between TKX-50-based composite explosives and other composite explosives // *J. Energ. Mater.* — 2019. — V. 37. — P. 162–173.
127. **Yu Y.-H., Chen S.-S., Li T.-J., Jin Sh.-H., Zhang G.-G., Chenband M.-L., Li L.-J.** Study on a novel high energetic and insensitive munitions formulation: TKX-50 based melt cast high explosive // *RSC Adv.* — 2017. — V. 7, N 50. — P. 31485–31492.
128. **Sinditskii V. P., Filatov S. A., Kolesov V. I., Kapranov K. O., Asachenko A. F., Nechaev M. S., Lunin V. V., Shishov N. I.** Combustion behavior and physico-chemical properties of dihydroxyammonium 5,5-bistetrazole-1,1-diolate (TKX-50) // *Thermochim. Acta.* — 2015. — V. 614. — P. 85–92.
129. **Gottfried J. L., Klapötke T. M., Witkowski T. G.** Estimated detonation velocities for TKX-50, MAD-X1, BDNAPM, BTNPM, TKX-55, and DAAF using the laser-induced air shock from energetic materials technique // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 4. — P. 353–359.
130. **Provatas A.** Energetic polymers and plasticisers for explosive formulations: a review of recent advances. — DSTO Aeronaut. Maritime Res. Lab., 2000.
131. **Simmons R. L., Walsh C. M.** Designing advanced gun propellants with improved energy release // *32nd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2001.* — P. 43.1–43.11.
132. **Randal A., Mallay J. J.** Stability and performance characteristics of NENA materials and formulations // *Energetic Materials Technology: Proc. of the American Defence Preparedness Association, 1992.* — P. 116.
133. **Bohn M. A.** Determination of the kinetic data of the thermal decomposition of energetic plasticizers and binders by adiabatic self heating // *Thermochim. Acta.* — 1999. — V. 337, N 1-2. — P. 121–139.
134. **Schmitt D., Eyerer P., Elsner P.** Insensitive high-performance energetic materials — applied research for optimized products // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1997. — V. 22, N 3. — P. 109–111.
135. **Tzeng D. D., Jones M. L.** Low cost binder for IM applications // *JANNAF Propulsion Meeting, 1998.* — V. 1. — P. 97–99. — (CPIA Publ.; 675).
136. **Chan M., Turner A.** Insensitive high energy booster propellant: US Pat. 2002166612 A1. — Nov. 14, 2002.
137. **Chakraborty T. K., Raha K. C., Omprakash B., Singh A.** A study on gun propellants based on butyl-NENA // *J. Energ. Mater.* — 2004. — V. 22, N 1. — P. 41–53.
138. **Damse R. S., Omprakash B., Tope B. G., Chakraborty T. K., Singh A.** Study of N-n-butyl-N-(2-nitroxyethyl)nitramine in RDX based gun propellant // *J. Hazard. Mater.* — 2009. — V. 167, N 1-3. — P. 1222–1225.
139. **Ritter H., Baschung B., Franco P.** Increase of gun performance using co-layered propellants based on NENA formulations // *8th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2007.* — V. 3. — P. 16/1–16/11.
140. **Skacel R., Zigmund J., Akstein Z., Riha L., Dudek K., Nesvadba P.** Plastic explo-

- sives with energetic system // *New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. of the 14th Seminar, Pardubice, Czech Republic.* — 2011. — P. 933–938.
141. **Wilker S., Gjersøe R., Stensland P., Becher Ch.** Stability analysis of *n*-butyl-nitrateethylnitramine (Bu-NENA) // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2007. — V. 4, N 3. — P. 59–80.
142. **Damse R. S., Singh A.** Evaluation of energetic plasticizers for solid gun propellant // *Defence Sci. J.* — 2008. — V. 58, N 1. — P. 86–93.
143. **Rao K. P. C., Sikder A. K., Kulkarni M. A., Bhalerao M. M.** Studies on *n*-butyl nitroxyethylnitramine (*n*-BuNENA): synthesis, characterization and propellant evaluations // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2004. — V. 29, N 2. — P. 93–98.
144. **Qi X., Li H., Zhao Y., Yan N.** Comparison of the structural and physical properties of nitrocellulose plasticized by *N*-butyl-*N*-(2-nitroxy-ethyl) nitramine and nitroglycerin: Computational simulation and experimental studies // *J. Hazard. Mater.* — 2019. — V. 362. — P. 303–310.
145. **Pesce-Rodriguez R. A., Shaw F. J., Fifer R. A.** Pyrolysis GC-FTIR studies of a LOVA propellant formulation series // *J. Energ. Mater.* — 1992. — V. 10. — P. 221–250.
146. **Doriath G.** Challenges in propellants and combustion: 100 years after Nobel // *4th Int. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion, Stockholm, 1997.*
147. **Kim H.-So.** Improvement of mechanical properties of plastic bonded explosive using neutral polymeric bonding agent // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1999. — V. 24, N 2. — P. 96–98.
148. **Bohn M. A., Eisele S.** Stability and service time period assessment of novel solid rocket propellant formulations // *32nd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2001.* — P. 152.1–152.13.
149. **Menke K., Eisele S., Bohn M.** Fast burning minimum smoke propellants based on GAP/CL20 // *Insensitive Munitions and Energ. Mater. Technol. Symp.* — 2001. — V. 2. — P. 871–887.
150. **Warren L. C., Thompson D. M.** Conductive polymers to improve propellant insensitivity-impact and friction-properties: US Pat. US 6.521.063 B1. — Feb. 18, 2003.
151. **McDonald B. A.** Study of the effects of aging under humidity control on the thermal decomposition of NC/NG/BTTN/RDX propellants // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2011. — V. 36, N 6. — P. 576–583.
152. **Li W., Pang A.-M., Guo X.** Molecular dynamics simulation on nanoaluminumbinder and nanoaluminumplasticizer blends of high energy solid propellant ingredients // *41st Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2010.* — P. li1.1–li1.10.
153. **Huang Zh.-P., Nie H.-Y., Zhang Y.-Y., Tan L.-M., Yin H.-L., Ma X.-G.** Migration kinetics and mechanisms of plasticizers, stabilizers at interfaces of NEPE propellant/HTPB liner/EDPM insulation // *J. Hazard. Mater.* — 2012. — V. 229-230. — P. 251–257.
154. **Bhowmik D., Sadavarte V. S., Charbhe V. D., Pande S. M.** Studies on sensitivity of nitrate ester plasticized hydroxyl terminated prepolymer based energetic solid rocket propellants // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 14, N 3. — P. 605–620.
155. **Medard L., Thomas M.** // *Mem. Poudres.* — 1954. — V. 36. — P. 97.
156. **Zucker J., Trask B., Costa F.** Nitrocellulose doublebase propellant containing ternary mixture of nitrate esters: US Pat. 3.867.214 A. — Feb. 18, 1975.
157. **Crescenzo F. G., Dow R. L.** Gas generator compositions: US Pat. 3.639.183 A. — Feb. 1, 1972.
158. **Baldwin M. G., Gehlhaus P. H.** High energy acrylic prepolymer propellants of low sensitivity: US Pat. 3.785.887 A. — Jan. 15, 1974.
159. **Wion D.** Manual assist terminal applicator: US Pat. 3.804.603 A. — Apr. 16, 1974.
160. **Griffith G. L.** Tmetn-inorganic nitrate explosives blended with aluminum: US Pat. 3.580.753 A. — May 25, 1971.
161. **Ampleman G., Brousseau P., Diaz E., Dubois Ch., Thiboutot S.** Insensitive melt cast explosive compositions containing energetic thermoplastic elastomers: Eur. Pat. Appl. EP 1167324 A1. — Jan. 2, 2002.
162. **Oyumi Y., Kimura E., Hayakawa Sh., Nakashita G., Kato K.** Insensitive munitions (IM) and combustion characteristics of GAP/AN composite propellants // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1996. — V. 21, N 5. — P. 271–275.
163. **Pleshakov D. V., Kondakova N. N., Il'icheva N. N.** Thermodynamic compatibility of synthetic polymers with high-energy plasticizers // *43rd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2012.* — P. 47.1–47.10.
164. **Newman K. E., Jones S. L., Leonard L. B. III, Lowell M. D., Knutson D. T.** Method for making insensitive enhanced blast explosive molding powders: US Pat. 7.789.983 B1. — Sep. 7, 2010.
165. **Landsem E., Jensen T. L., Kristensen T. E., Hansen F. K., Benneche T., Unneberg E.** Isocyanate-free and dual curing of smokeless composite rocket propellants // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2013. — V. 38, N 1. — P. 75–86.
166. **Meyer R., Köhler J., Homburg A.** Explosives. — 6th ed. — Weinheim: John Wiley & Sons, 2007.
167. **Hughes C. D., Blau R. J.** Double-base rocket propellants, and rocket assemblies comprising the same: US Pat. 6.607.617 B1. — Aug. 18, 2000.

168. **Graham W. H., Askins R. E., Stanley R. L.** Nitrate ester stabilizing layer for propellant grain: US Pat. 5.398.612 A. — Mar. 21, 1995.
169. **Xiao Zh.-G., Ying S.-J., Xu F.-M.** Response of TEGDN propellants to plasma ignition with the same magnitude of ignition energy as conventional igniters in an interrupted burning simulator // Propell., Explos., Pyrotech. — 2015. — V. 40, N 4. — P. 484–490. — DOI: 10.1002/prop.201400215.
170. **Hamilton R. S., Wardle R. B.** Synthesis of bis(2,2-dinitropropyl)acetal (BDNPA): US Pat. 5.648.556. — Jul. 15, 1997.
171. **Leu An Lu, Shen Sh. M., Wu B. H., Chen S. I., Yeh H. Ch., Bai G. Ch.** // 21st Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1990. — P. 6/1–6/14.
172. **Eisele S., Zimdahl L., Menke K.** Fast burning rocket propellants based on silicone and GAP binder formulation // 33rd Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2002. — P. 145.1–145.15.
173. **Gore G. M., Tipare K. R., Divekar C. N., Bhatewara R. G., Asthana S. N.** Studies on effect of incorporation of BDNPF/A on burning rates of RDX/AP/AI filled CMDB propellants // J. Energ. Mater. — 2002. — V. 20, N 3. — P. 255–278.
174. **Nair U. R., Gore G. M., Sivabalan R., Divekar C. N., Asthana S. N., Singh H.** Studies on advanced CL-20-based composite modified double-base propellants // J. Propul. Power. — 2004. — V. 20, N 5. — P. 952–955.
175. **Menke K., Kempa P. B., Keicher T., Kawamoto A., Holanda J. A. S.** High energetic composite propellants based on AP and GAP/BAMO copolymers // 38th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2007. — P. 82.1–82.10.
176. **Nicolich S. M., Capellos C., Balas W. A., Akester J. D., Hatch R. L.** High-blast explosive compositions containing particulate metal: US Pat. 8.168.016 B1. — May 1, 2012.
177. **Bunte G., Schuppler H., Krause H.** Thermal analytical characterization of DNDA-5, DNDA-6 and DNDA-7 and certain binary and ternary mixtures // 35th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2004. — P. 174.1–174.8.
178. **Kessler A., Stein W.** Investigations concerning modifications of the properties of loaded DNDA propellant // 36th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2005. — P. 51.1–51.11.
179. **Bohn M. A., Mueller D.** Insensitivity aspects of NC bonded and DNDA plasticizer containing gun propellants // 37th Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2006. — P. 47.1–47.11.
180. **Pauly G., Scheibel R.** Burning behavior of nitramine gun propellants under the influence of pressure oscillations // Propell., Explos., Pyrotech. — 2010. — V. 35, N 3. — P. 284–291.
181. **Skacel R., Zigmund J., Akstein Z., Riha L., Dudek K., Nesvadba P.** Plastic explosives with energetic binding systems // New Trends in Research of Energetic Materials: Proc. of the 14th Seminar, Pardubice, Czech Republic. — 2011. — V. 2. — P. 933–938.
182. **Maraden A. M. A., Stojan P., Zigmund J., Matyáš R.** BuNENA-DNDA57 combined energetic plasticizer for modified cast double base propellants // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2018. — V. 15, N 3. — P. 485–500.

Поступила в редакцию 26.04.2019.

После доработки 20.11.2019.

Принята к публикации 24.12.2019.