УДК 620.178.7

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ НАНОГЕКСОГЕНА И ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

G.-Z. Xu¹, X.-D. Gao², G.-L. Jin², D.-Q. Wang¹, Z.-M. Zhang¹, T.-Y. Tan¹, Y. Qin¹, J. Liu¹, F.-S. Li¹

¹National Special Superfine Powder Engineering Research Center of China, School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094 China, jie_liu_njust@126.com

²Gan Su Yin Guang Chemical Industry Group Co. Ltd, Baiyin 730900, China

Промышленный гексагидро-1,3,5-тринитро-1,3,5-триазин микронного размера (m-гексоген) широко используется в производстве пластических взрывчатых веществ (ПВВ) на основе гексогена. Однако механические и адгезивные свойства основанного на m-гексогене ПВВ (m-ГПВВ) недостаточно удовлетворительны. Применение частиц нанометрового размера (n-гексоген) с большой эффективной площадью поверхности обеспечивает больший контакт с полимерным компонентом. Таким образом, использование n-гексогена приводит к улучшению пористости и сжимаемости m-ГПВВ. Исследованы микроструктура, состав, сжимаемость, чувствительность и детонационные характеристики ГПВВ на основе m-гексогена и n-гексогена. Показано, что n-гексоген делает ГПВВ более компактным, чем m-гексоген. Деформация n-ГПВВ увеличилась на 39.7 % по сравнению с m-ГПВВ при тех же пропорциях каждого компонента. n-ГПВВ обладает более низкой чувствительностью по сравнению с m-ГПВВ, а их скорости детонации, давление и теплота детонации одинаковы.

Ключевые слова: наногексоген, ПВВ на основе гексогена, сжимаемость, детонационные свойства, механические свойства.

DOI 10.15372/FGV20230112

ВВЕДЕНИЕ

Гексагидро-1,3,5-тринитро-1,3,5-триазин (гексоген) относится к производным от нитрата аммония взрывчатым веществам (ВВ), легко инициируемым и детонирующим с высокой скоростью. Его вводят в пластические ВВ с полимерным связующим (ПВВ) для уменьшения чувствительности [1–6]. До настоящего времени индустриальный гексоген с микронным размером частиц (т-гексоген) широко используется в ПВВ на основе гексогена (ГПВВ) [3, 7–14]. Однако при использовании ГПВВ возникают некоторые проблемы. Например, высокая пористость и плохая сжимаемость ПВВ на основе т-гексогена (m-ГПВВ) обусловливают его низкую устойчивость к повышенным нагрузкам [4, 15–17]. При механических нагрузках внутренняя структура m-ГПВВ может измениться и его детонационная чувствительность будет

существенно другой [15, 18, 19]. Эта проблема сильно ограничивает пределы использования m-ГПВВ.

В работах [20, 21] описано изготовление наногексогена (п-гексогена) путем мокрого помола в шаровой мельнице и вакуумной сублимационной сушки. Вследствие малых размеров частиц увеличивается площадь контакта с полимерной системой, что уменьшает расстояние между наночастицами гексогена и улучшает компрессионные свойства n-ГПВВ.

В настоящей работе исследовались микроструктура, содержание компонентов, сжимаемость, чувствительность и параметры детонации m-ГПВВ и n-ГПВВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Материалы

Использовались m-гексоген ($d_{50} = 80 \div 120$ мкм) производства Gansu Yinguang Chemical Industry Group Co., Ltd; n-гексоген,

[©] Xu G.-Z., Gao X.-D. , Jin G.-L., Wang D.-Q.,

Zhang Z.-M., Tan T.-Y., Qin Y., Liu J., Li F.-S., 2023.

приготовленный, как в работах [20, 21]; 2,4динитротолуол (ДНТ), Chemical Reagent Co., Ltd; поливинил ацетат (ПВАц), Shanghai Zi yi Reagent Factory; стеариновая кислота (СК), Chemical Reagent Co., Ltd; этиловый эфир аналитической чистоты, Chemical Reagent Co., Ltd; этилацетат аналитической чистоты, Shanghai Ling Feng Chemical Reagent Co., Ltd.

1.2. Приготовление ПВВ на основе п-гексогена

Массовое соотношение компонентов в формуле ГПВВ составляло гексоген : ДНТ : ПВАц : CK = 94.5 : 3 : 2 : 0.5. Каждый компонент взвешивали в расчете на 100 г ПВВ. ПВВ готовили методом водной суспензии в растворе. В три колбы помещали гексоген и деионизированную воду в определенных массовых отношениях, этилацетатный раствор ДНТ и ПВАц капали в колбы с помощью воронки постоянного давления. Гексоген перемешивали со скоростью 600 об/мин при температуре 75 °C. Связующее вещество (5 % (об.)) добавляли каплями со скоростью 3 мл/мин при температуре 85 °C. После этого добавляли, перемешивая, стеариновую кислоту, с тем чтобы расплавить ее и равномерно распределить по объему. При этом необходимо дождаться полного испарения растворителя. В конце процесса температура уменьшалась ниже 35 °C. Фильтрация, промывка и сушка выполнялись при 50 °C для получения формовочного порошка ПВВ.

1.3. Методы исследования характеристик ПВВ на основе n-гексогена

1.3.1. Микроструктура

Микроструктуру формовочного порошка ГПВВ и микроструктуру столбика заряда исследовали соответственно на оптическом микроскопе (Eclipse 55i, Nikon) и эмиссионном сканирующем электронном микроскопе (FE-SEM, S-4800 II, Hitachi).

1.3.2. Состав соединения

Состав формовочного порошка ГПВВ анализировали через экстракцию растворителем, основываясь на разной растворимости компонентов ПВВ по отношению к каждому из используемых растворителей. Сначала связующее вещество (ДНТ и ПВАц) растворяли и отделяли с помощью этилацетата. Затем ПВАц растворяли и отделяли в этаноле при 0 °C. На третьем шаге с помощью этилового эфира растворяли и отделяли стеариновую кислоту. Наконец, ацетоном растворялся и выделялся гексоген. Количество каждого компонента образцов формовочного порошка определялось как среднее по результатам трех тестов.

1.3.3. Сжимаемость

Для определения эффективности сжатия образца ГПВВ использовался метод прессования. Его суть заключается в следующем. Образец ПВВ помещается между верхней и нижней пластинами пресса установки для испытания механических свойств материалов и нагружается вдоль оси с определенной скоростью при определенной температуре. Пластины пресса непрерывно сжимают образец до тех пор, пока он не начинает разрушаться. В этом случае прочность на сжатие определяется как

$$S_c = Q_c / A,\tag{1}$$

где Q_c — сила (максимальная нагрузка), A — площадь поперечного сечения. Относительная деформация определяется по формуле

$$\varepsilon = \Delta L_c / L_0, \tag{2}$$

где ΔL_c — эффективное сжатие (изменение длины образца), L_0 — исходная длина образца.

Для тестирования прочности на сжатие образца ПВВ использовалась универсальная компьютеризированная установка для испытания механических свойств материалов СТМ8050. Все тесты выполнены при скорости нагружения 10 мм/мин и окружающей температуре 20 °C. Начальная длина L_0 , диаметр D, масса и плотность ρ каждого из образцов были равны 19.30 мм, 19.82 мм, 10 г и 1.68 г/см³ соответственно. По мере того как происходит сжатие образца, установка СТМ8050 строит кривую зависимости нагрузки (напряжение F) от сжатия L_c. Максимальной нагрузке материала соответствует максимум напряжения на кривой $F(L_c)$. Эффективное расстояние сжатия ΔL_c соответствовало сжатию в интервале $(0.1 \div 1)Q_c$. Значения прочности на сжатие S_c и деформации є образца ПВВ получены по результатам осреднения пяти измерений.



Рис. 1. Микроструктура формовочных порошков m-ГПВВ (a) и n-ГПВВ (б)

1.4. Чувствительность к трению, удару и ударной волне

Чувствительность к трению измерялась в тесте на трение скольжения при давлении 3.92 МПа. Было выполнено 50 тестов для получения средней вероятности детонации (P, %).

Чувствительность к удару проверялась в тесте с падающим молотом массой 5 кг и определялась по характерным высотам (50 % инициирования — H_{50}), которые вычислялись статистически по результатам 25 эффективных тестов.

Чувствительность к ударной волне образцов ГПВВ измерялась в тесте по передаче детонации через промежуток (GAP-тест). Внутренний диаметр бустерного заряда из тетрила плотностью 1.55 г/см³ составлял 40.0 мм, его длина 24.5 мм. В качестве передаточного материала использовался триацетат целлюлозы. Внутренний диаметр и длина принимающего заряда были 25.0 и 76.0 мм соответственно. Плотность образцов ПВВ — 1.64 г/см³. Толщина передающего слоя вычислялась по 25 значениям.

1.5. Скорость, давление и теплота детонации

Скорость детонации формовочного порошка ГПВВ определялась путем измерения времени распространения волны. Внутренний диаметр и длина бустерного заряда, состоящего на 90 % из ТМD (своего рода колонка для передачи детонации), равнялись 20.0 мм. Щуп был выполнен из эмалированной проволоки диаметром 0.1 мм. Давление детонации формовочного порошка ПВВ на основе гексогена измерялось с помощью манганинового датчика типа Н, датчик был упакован в политетрафторэтилен (ПТФЭ), выходной ток импульсного источника постоянного тока превышал 8 А.

Теплота детонации измерялась при постоянной температуре адиабатическим методом. Экспериментальный образец заряда диаметром и длиной 25.0 мм и 27.0 мм соответственно детонировал с помощью детонатора № 8 (без бустерного заряда) в условиях вакуума в детонационной термокамере при лабораторной температуре 20±2 °C, точность градуировки платинового резистивного термометра 0.001 °C.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Микроструктура

На рис. 1 показана микроструктура формовочного порошка ГПВВ. В связующей системе m-гексогена существуют большие поры и частицам m-гексогена из-за их большого размера трудно заполнить полости между частицами формовочного порошка. В результате формовочный порошок m-ГПВВ характеризуется грубой поверхностью.

На поверхности порошка n-ГПВВ невозможно увидеть одиночную частицу гексогена. В связующей системе n-гексогена зазоры меньше, и сила сцепления n-гексогена и связующего будет выше. В результате формовочный порошок n-ГПВВ имеет более гладкую поверхность.

На рис. 2 видно, что на поверхности столбика заряда m-ГПВВ есть углубления, а структура столбика недостаточно плотная. Поверхность же n-ГПВВ плотная и без углублений.



Рис. 2. Микроструктура поверхности и сечения столбика заряда ГПВВ: a — поверхность m-ГПВВ, б — поверхность n-ГПВВ,
 e — сечение m-ГПВВ, e — сечение m-ГПВВ,
 e — сечение m-ГПВВ, e —

При образовании трещины в столбике m-ГПВВ получающаяся поверхность негладкая, и трещина в столбике m-ГПВВ является очевидной границей раздела крупных частиц. Но когда столбик n-ГПВВ разламывался, образовавшееся поперечное сечение было плоским, а частицы плотными.

2.2. Содержание компонентов

Из табл. 1 видно, что содержание каждого компонента в m-ГПВВ и n-ГПВВ в целом то же

Массовый состав ГПВВ

Образец	Гексоген, %	Связ вещее	CK, %		
		ДНТ	ПВАц		
m-ГПВВ	94.55	2.98	1.98	0.49	
n-ΓΠΒΒ	94.52	2.99	1.99	0.50	

Таблица 1

самое и находится в соответствии с химической формулой вещества. Результаты показывают, что в процессе приготовления небольшая часть n-ГПВВ терялась. Основная причина — малый размер частиц n-гексогена, которые остаются в растворе. В целом эти потери приемлемы. В то же самое время в процессе отделения каждого компонента всегда остается осадок, в результате чего анализ дает содержание компонента слегка меньше того, которое должно быть согласно формуле.

2.3. Сжимаемость

На рис. 3, *а* видно, что в тестах на сжатие m-ГПВВ напряжение *F* в области $F \leq 460$ H увеличивается слабо при увеличении L_c , но при дальнейшем увеличении L_c сила *F* быстро возрастает и по достижении максимума начинает быстро убывать, что указывает на разрушение столбика m-ГПВВ. Для столбика m-ГПВВ максимальная нагрузка составила $Q_c \approx 4600$ H при скорости сжатия



Рис. 3. Результаты тестов на сжатие порошков m-ГПВВ (a) и n-ГПВВ (b)

10.00 мм/мин. Для столбика n-ГПВВ $F \leq$ 920 H напряжение F возрастает медленно, а при $F \gtrsim$ 920 H возрастает быстро с увеличением L_c . После достижения значения $F \approx$ 9 200 H напряжение F уменьшается быстро с увеличением L_c , что указывает на разрушение столбика n-ГПВВ. В экспериментальных условиях n-ГПВВ может выдержать нагрузку $Q_c = 9\,200$ H. Прочность на сжатие S_c для m-ГПВВ и n-ГПВВ получена из формулы (1) и приведена в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при $\rho = 1.68 \text{ г/см}^3$ для m-ГПВВ получены средние значения $Q_c =$ 4 498.6 H и $S_c = 14.59$ МПа, а для n-ГПВВ — $Q_c = 8.632.3$ H и $S_c = 27.99$ МПа (увеличение S_c для n-ГПВВ 91.8 %).

При $F < 0.1Q_c$ напряжение F медленно изменяется с увеличением L_c , что может быть следствием локального сжатия, вызванного неравномерным сечением столбика ГПВВ. Величина F при превышении 10 % Q_c pacтет быстро с увеличением L_c , что указывает на общее сжатие столбика ГПВВ. Поэтому изменение L_c , соответствующее интервалу $(0.1 \div 1)Q_c$, выбрано для индикации ΔL_c , и деформация ε вычислялась по формуле (2). Результаты показаны в табл. 2. Для m-ГПВВ и n-ГПВВ средние значения ΔL_c составили 0.78 и 1.09 мм соответственно, а средние значения ε равны 4.04 и 5.65 % (увеличение ε для n-ГПВВ 39.7 %). Это может происходить главным образом из-за того, что n-гексоген состоит из более мелких частиц, более однородных по размеру и с большей удельной площадью. По этим причинам взаимодействие между связующим веществом и n-гексогеном оказывается более силь-

Таблица 2

Сжимаемость m-ГПВВ и n-ГПВВ
$(D=19.82$ мм, $L_0=19.30$ мм, $ ho=1.683$ г/см $^3)$

Образец		$\substack{Q_c,\\\mathrm{H}}$	$S_c,$ M Π a	$\Delta L_c,$ MM	$\overset{arepsilon}{\%}$
	1	4599.8	14.92	0.75	3.89
m-ГПВВ	2	4771.0	15.47	0.71	3.68
	3	4732.4	15.35	0.71	3.68
	4	4250.2	13.78	0.75	3.89
	5	4 139.8	13.42	0.96	4.97
	Среднее	4 498.6	14.59	0.78	4.04
	1	8 2 4 6.8	26.74	1.32	6.84
n-ГПВВ	2	8059.8	26.14	1.08	5.06
	3	9199.7	29.83	1.15	5.96
	4	8 153.3	26.44	0.83	4.30
	5	9 501.8	30.81	1.09	5.65
	Среднее	8632.3	27.99	1.09	5.65

ным. При воздействии аксиального давления зазор между частицами уменьшается в процессе экструзии, сила между n-гексогеном и связующим веществом увеличивается, в то же время прочность столбика возрастает. Частицы m-гексогена меньше контактируют со связующим, и их сила сцепления меньше из-за большего размера частиц и большего разброса размеров. Поэтому прочность к сжатию n-ГПВВ очевидно выше, чем прочность m-ГПВВ.

Из приведенного анализа можно заключить, что при использовании в ГПВВ n-гексогена свойства сжимаемости (Q_c и ε) ГПВВ существенно улучшаются.



Рис. 4. Чувствительность формовочного порошка ГПВВ:

2.4. Чувствительность к трению, удару и ударной волне

Как показано на рис. 4, в настоящих экспериментах (при 90 °С и 3.92 МПа) вероятность возбуждения детонации m-ГПВВ в испытаниях на трение составляет 38 %. Для n-ГПВВ этот параметр ниже на 8 %, т. е. чувствительность к трению снижена на 21.1 %.

При ударе молота массой 5 кг характерная высота падения H₅₀ для m-ГПВВ равна 29.8 см, для n-ГПВВ — 46.3 см, т. е. чувствительность к удару образцов с наночастицами на 55.4 % меньше, чем у образцов с микронными частицами. По мере уменьшения размера частиц основного вещества (гексогена) среднеквадратичное отклонение (SD) характерной высоты H₅₀ уменьшается, что указывает на более высокую детонационную стабильность n-ГПВВ. Благодаря большей однородности размера частиц и более регулярной их форме, поверхность формовочного порошка n-ГПВВ является относительно плотной, в результате детонация при ударе происходит примерно одинаково и среднеквадратичное отклонение значений H₅₀ оказывается малым. Формовочный порошок m-ГПВВ, наоборот, состоит из частиц разных размеров неправильной формы и имеет грубую поверхность, в результате детонация при ударе происходит по-разному и среднеквадратичное отклонение H_{50} оказывается больше.

По сравнению с m-ГПВВ зазор между частицами n-ГПВВ был на 4.4 мм меньше, что означает уменьшение чувствительности к ударной волне образцов с меньшим размером частиц на 13.7 %. Кроме того, видно, что при действии ударной волны стандартное отклонение значений промежутка для образцов с наночастицами меньше, чем для образцов с микрочастицами, что указывает на более высокую детонационную устойчивость формовочного порошка n-ГПВВ к воздействию ударной волны. Причиной этому служат более высокая однородность, достаточно регулярная форма и относительно плотная поверхность формовочного порошка n-ГПВВ. Вероятность детонации этого порошка под действием ударной волны в проведенных экспериментах достаточно близка и среднеквадратичное отклонение значений H₅₀ невелико. Напротив, формовочный порошок т-ГПВВ состоит из частиц разного размера, неправильной формы, с относительно грубой поверхностью. Вероятность детонации таких порошков под действием ударных волн изменяется в широких пределах, что приводит к значительным изменениям в среднеквадратичном отклонении характерной высоты падения H_{50} .

2.5. Скорость, давление и теплота детонации

Скорость, давление и теплота детонации образцов m-ГПВВ и n-ГПВВ представлены в табл. 3. Видно, что эти параметры довольно близки для образцов нано- и микропорошков. Тем не менее, по сравнению с m-гексогеном n-гексоген имеет большую удельную площадь поверхности, что несколько уменьшает эффективность сжатия приготовленных образцов ГПВВ при том же самом давлении. Благодаря тому, что n-гексоген состоит из частиц малых размеров, некоторая их часть может быть потеряна в процессе приготовления, что уменьшает актуальное содержание n-гексогена в составе вещества. В конечном итоге однород-

Т	\mathbf{a}	б	л	и	ц	а	3
---	--------------	---	---	---	---	---	---

Скорость детонации, давление в детонационной волне, удельная теплота детонации формовочного порошка ГПВВ

Образец	$ ho, \\ \Gamma/cm^3$	<i>v</i> , м/с (SD)	$p, \Gamma \Pi a$ (SD)	q, кДж/кг (SD)
m-ГПВВ	1.643	$8195.5 \\ (30.0)$	24.96 (0.95)	$5596.08 \\ (9.67)$
n-ГПВВ	1.640	$8139.5\(65.5)$	24.80 (1.42)	$5552.32 \\ (26.07)$

¹ — чувствительность к трению (*P*), 2 — чувствительность к удару (H_{50}), 3 — чувствительность к ударной волне (δ)

ность плотности ГПВВ слегка меняется. Даже небольшое изменение в однородности плотности может изменить эффективность приготовленного ГПВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формовочный порошок n-ГПВВ готовили на основе n-гексона в виде суспензии в воде. Получены характеристики микроструктуры, состава, сжимаемости, чувствительности ГПВВ и их детонационные характеристики. Содержание каждого компонента в n-ГПВВ соответствовало формуле, что свидетельствует об отсутствии потерь n-гексогена при приготовлении n-ГПВВ и об обоснованности способа его приготовления. n-ГПВВ имеет более гладкую поверхность и сечение, чем m-ГПВВ, поскольку размер частиц n-гексогена меньше. Это способствует более тесному соединению nгексогена со связующим веществом, что приводит к увеличению прочности на сжатие и деформации приготовленного n-ГПВВ. Поскольку размер частиц п-гексогена меньше, чем тгексогена, n-ГПВВ обладает более низкой чувствительностью. Кроме того, теплота детонации, скорость детонации и давление детонации п-ГПВВ практически не меняются по сравнению с m-ГПВВ. Показано, что замена всего гексогена на n-гексоген оказывает незначительное влияние на взрывчатые свойства ГПВВ.

В дальнейшем при приготовлении ГПВВ можно попытаться отрегулировать соотношение n-гексогена к m-гексогену. Путем замены части m-гексогена n-гексогеном можно увеличить силу взаимодействия между гексогеном и связующим веществом, а также уменьшить потери в процессе приготовления, вызванные малым размером частиц n-гексогена.

ЛИТЕРАТУРА

- He Z., Meng T., Wang Y., Guo Z., Liu Z. Effect of 2,4,6-triamino-3,5-dinitropyridine-1-oxide on the properties of 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazinane-based PBX explosives // Propell., Explos., Pyrotech. 2021. V. 46, N 4. P. 530–536. DOI: 10.1002/prep.202000278.
- 2. Liu J., Bao X. Z., Rong Y. B., et al. Preparation of nano-RDX-based PBX and its thermal decomposition properties // J. Therm. Anal. Calorim. — 2017. — V. 131, N 3. — P. 2693– 2698. — DOI: 10.1007/s10973-017-6731-4.
- 3. Van der Heijden A. E. D. M., Bouma R. H. B. Characterization of

granular and polymer-embedded RDX grades: Floret tests // Propell., Explos., Pyrotech. — 2016. — V. 41, N 2. — P. 360–366. — DOI: 10.1002/prep.201500275.

- 4. Li T., Hua C., Li Q. Shock sensitivity of pressed RDX-based plastic bonded explosives under short-duration and high-pressure impact tests // Propell., Explos., Pyrotech. 2013. V. 38, N 6. P. 770–774. DOI: 10.1002/prep.201300012.
- Zeman S., Hussein A. K., Jungova M., Elbeih A. Effect of energy content of the nitraminic plastic bonded explosives on their performance and sensitivity characteristics // Defence Technol. — 2019. — V. 15, N 4. — P. 488– 494. — DOI: 10.1016/j.dt.2018.12.003.
- 6. Jia X., Xu L., Hu Y., et al. Preparation of agglomeration-free composite energetic microspheres taking PMMA-PVA with honeycomb structure as template via the molecular collaborative self-assembly // J. Energy Mater. — 2021. — V. 39, N 2. — P. 182–196. — DOI: 10.1080/07370652.2020.1762803.
- Singh A., Singla P., Sahoo S. C., Soni P. K. Compatibility and thermal decomposition behavior of an epoxy resin with some energetic compounds // J. Energy Mater. — 2020. — V. 38, N 4. — P. 432–444. — DOI: 10.1080/07370652.2020.1727997.
- Tan K. Y., Han Y., Luo G., et al. Study on the detonation reaction-zone and energy release characteristics of a cast HMXbased PBX // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2019. — V. 16, N 3. — P. 380–398. — DOI: 10.22211/cejem/112285.
- Cai X., Zhang W., Gao Y., et al. Damage mode and characterization of RDX-based PBX explosive under tri-axial impact loading // J. Vib. Shock. — 2019. — V. 38, N 5. — P. 86–91. — DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.05.012.
- Temple T., Goodwin C., Ladyman M. K., Mai N., Coulon F. Optimised accelerated solvent extraction of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) from polymer bonded explosives // Propell., Explos., Pyrotech. — 2018. — V. 43, N 11. — P. 1171–1177. — DOI: 10.1002/prep.201800185.
- Qin J., Zhao X., Qian H., Rui J. Effect of crystal structure of high density spherical RDX on safety performance of PBX // Acta Armamentarii. — 2020. — V. 41, N 3. — P. 481–487. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.03.008.
- Kim Y., Park Y., Yoh J. J. Slow and rapid thermal decomposition characteristics of enhanced blast explosives for burning in fuelrich, oxygen-rich conditions // Thermochim. Acta. — 2019. — V. 678. — 178300. — DOI: 10.1016/j.tca.2019.178300.

- Kumar M., Ladyman M. K., Mai N., Temple T., Coulon F. Release of 1,3,5trinitroperhydro-1,3,5-triazine (RDX) from polymer-bonded explosives (PBXN-109) into water by artificial weathering // Chemosphere. — 2017. — V. 169. — P. 604–608. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.107.
- 14. Bai Z. L., Duan Z. P., Wen L. J., Zhang Z., Ou Z. C., Huang F. Embedded manganin gauge measurements and modeling of shock initiation in HMX-based PBX explosives with different particle sizes and porosities // Propell., Explos., Pyrotech. — 2020. — V. 45, N 6. — P. 908–920. — DOI: 10.1002/prep.201900376.
- Drodge D. R., Williamson D. M. Understanding damage in polymer-bonded explosive composites // J. Mater. Sci. 2016. V. 51, N 2. P. 668–679. DOI: 10.1007/s10853-013-7378-6.
- Proud W., Greenaway M. W., Siviour C. R., et al. Characterising the response of energetic materials and polymer-bonded explosives (PBXs) to high-rate loading // MRS Online Proc. Library. 2005. V. 896. 0896-H08-02. DOI: 10.1557/PROC-0896-H08-02.
- 17. Kang G., Chen P., Guo X., Ma G., Ning Y. Simulations of meso-scale deformation and damage of polymer bonded explosives by the numerical manifold method // Eng. Anal. Boundary Elements. — 2018. — V. 96. — P. 123– 137. — DOI: 10.1016/j.enganabound.2018.08.011.

- Ravindran S., Tessema A., Kidane A. Local deformation and failure mechanisms of polymer bonded energetic materials subjected to high strain rate loading // J. Dynamic Behavior Mater. 2016. V. 2, N 1. P. 146–156. DOI: 10.1007/s40870-016-0051-9.
- Zhou Z., Chen P., Duan Z. Study on fracture behavior of a polymer-bonded explosive simulant subjected to uniaxial compression using digital image correlation method // Strain. — 2012. — V. 48, N 4. — P. 326–332. — DOI: 10.1111/j.1475-1305.2011.00826.x.
- 20. Liu J., Jiang W., Yang Q., et al. Study of nano-nitramine explosives: preparation, sensitivity and application // Defence Technol. — 2014. — V. 10, N 2. — P. 184–189. — DOI: 10.1016/j.dt.2014.04.002.
- Liu J., Jiang W., Zeng J. B., et al. Effect of drying on particle size and sensitivities of nano hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine // Defence Technol. — 2014. — V. 10, N 1. — P. 9–16. — DOI: 10.1016/j.dt.2013.12.006.

Поступила в редакцию 11.03.2022. После доработки 18.04.2022. Принята к публикации 22.06.2022.