

УДК 544.452

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОТЕРМИТНОЙ КОМПОЗИЦИИ $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЦЕПТУРЫ СОСТАВА

В. В. Гордеев, М. В. Казутин, Н. В. Козырев

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, 659322 Бийск,
gordeev.vladimir92@yandex.ru

Представлены результаты исследования взрывчатых параметров нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ с добавкой 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазола (1Me-3H) в зависимости от содержания последней и соотношения компонентов базовой нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$. Введение в состав композиции добавки 1Me-3H приводит к повышению силы взрыва, но с увеличением содержания добавки выше определенного предела она начинает снижаться. В зависимости от рецептуры композиции удастся повысить силу взрыва на $22 \div 29$ % относительно нанотермита $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$. Изменение рецептуры состава позволяет варьировать скорость горения нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ в диапазоне $400 \div 690$ м/с в зарядах диаметром 2 мм и в диапазоне $120 \div 430$ м/с в слое толщиной 0.1 мм.

Ключевые слова: нанотермиты, рецептура, взрывчатые параметры, скорость горения, высокоэнергетические материалы.

DOI 10.15372/FGV2022.9259

ВВЕДЕНИЕ

Нанотермиты — наноразмерные порошкообразные смеси металла и оксида менее активного металла. В отличие от «классических» термитов, полученных смешением микроразмерных порошков, нанотермиты обладают рядом уникальных свойств:

– низкие критические параметры взрывчатого превращения, способность гореть в тонких слоях (0.1 мм и ниже) и миллиграммовых навесках [1–3];

– широкий диапазон линейных скоростей взрывчатого превращения, от нескольких сантиметров до тысяч метров в секунду в зависимости от компонентного состава и степени уплотнения [4–8];

– высокая чувствительность к механическим и электростатическим воздействиям [9–11].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПХЭТ СО РАН (проект № FUFE-2021-0005) при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Доложено на 10-й Международной конференции им. В. В. Воеводского «Химия и физика элементарных химических процессов», 5–9 сентября 2022 г., Новосибирск.

© Гордеев В. В., Казутин М. В., Козырев Н. В., 2023.

Ввиду представленных свойств, нанотермиты рассматриваются в качестве перспективного материала для создания различных пиротехнических микроэлектромеханических устройств [12–16]. Однако высокая чувствительность нанотермитов затрудняет их использование в практических приложениях. Возможным решением проблемы является введение модифицирующих добавок в нанотермитные системы. Например, в работах [11, 17–25] показано, что использование флегматизирующих добавок (дисульфид молибдена, фторополимеры, графен и т. п.) позволяет уменьшить механическую и электростатическую чувствительность нанотермитных систем, но приводит к существенному снижению взрывчатых характеристик, вплоть до потери способности горения в тонком слое (0.1 мм и менее). Есть исключения: так, при введении оксида графена в нанотермит $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ [19, 22] снижается чувствительность композиции к электростатическому разряду, а взрывчатые характеристики усиливаются. Рассматривается применение высокоэнергетических материалов в качестве добавок к нанотермитным системам. В работах [15, 26–32] показано, что введение перхлората аммония, нитроцеллюлозы, гексогена, гексанитрогексаазаизоюрцитана (С1-20) приводит к значительному

росту взрывчатых характеристик нанотермитных смесей, а в случае добавок нитроцеллюлозы и СI-20 удается несколько снизить чувствительность. Как правило, повышение взрывчатых параметров наблюдается до определенной концентрации высокоэнергетического материала в нанотермитной смеси, выше этой концентрации параметры снижаются.

В настоящее время экспериментальные данные по влиянию добавок на свойства нанотермитов имеют неоднозначный характер, вследствие чего описание природы взрывчатого взаимодействия различных материалов с нанотермитными системами затруднено. Таким образом, развитие представлений о механизме горения нанотермитов с добавками является актуальной задачей.

В наших работах [33–36] установлено, что добавка высокоэнергетического материала 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазола (1Ме-3Н) в большинстве случаев позволяет повысить взрывчатые характеристики исследуемых композиций, при этом зависимости этих параметров от содержания добавки имеют экстремальный характер. В работах [34–36] для систем $\text{CuO}/\text{Al}/1\text{Ме-3Н}$, $\text{MoO}_3/\text{Al}/1\text{Ме-3Н}$, $\text{SnO}_2/\text{Al}/1\text{Ме-3Н}$ было показано, что сила взрыва F исследуемых композиций существенно зависит от рецептуры — соотношения базовых компонентов нанотермитной пары и добавки.

Композиция $\text{V}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Ме-3Н}$ ранее детально не изучалась, и интерес к определению ее взрывчатых характеристик обусловлен тем, что пара $\text{V}_2\text{O}_3/\text{Al}$, по сравнению с CuO/Al , MoO_3/Al , SnO_2/Al , характеризуется существенно более высокой силой взрыва F и при этом самым низким среди рассматриваемых композиций энергетическим потенциалом, выраженным расчетной теплотой горения Q .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовались следующие материалы:

– оксид висмута Bi_2O_3 («Sigma Aldrich», США), средний размер частиц $90 \div 210$ нм, содержание основного компонента 99.8 %;

– алюминий («Передовые порошковые технологии», Россия), средний размер частиц $90 \div 150$ нм, содержание активного металла 82 %;

– 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Ме-3Н), синтезированное в ИПХЭТ СО РАН [37] малочувствительное высокоэнергетическое веще-

ство брутто-формулы $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$, энтальпия образования $\Delta H = 1.42$ кДж/г, температура плавления ≈ 65 °С, температура разложения $\approx 240 \div 250$ °С;

– растворители — ацетон (квалификации «ч.д.а.»), гексан (квалификации «х.ч.»).

Изготовление нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Ме-3Н}$ осуществлялось в следующей последовательности:

– приготовление раствора добавки в ацетоне;

– смешение компонентов нанотермитной смеси в растворе с добавкой и последующая ультразвуковая обработка суспензии;

– сушка суспензии;

– измельчение сухого порошка под слоем растворителя (ацетон, гексан);

– вакуумная сушка нанотермитной композиции с получением агломерированного порошка.

Ультразвуковую обработку суспензии проводили в ультразвуковой ванне ПСБ-1335-05 («ПСБ-Галс», Россия, выходная мощность генератора колебаний 50 Вт, рабочая частота ультразвуковых преобразователей 35 кГц). Время обработки составляло 30 мин при интенсивности ультразвукового воздействия $7 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

Рецептуры нанотермитных композиций выбирались исходя из следующих соображений:

I — соотношение компонентов тройной смеси $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Ме-3Н}$ соответствует максимальной расчетной теплоте взрыва композиции Q при заданном содержании 1Ме-3Н;

II — соотношение компонентов тройной смеси соответствует максимальному расчетному значению давления p при горении композиции в замкнутом объеме;

III — соотношение компонентов базовой нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 88/12 %, соответствующее максимальному расчетному значению Q , постоянно в тройной смеси;

IV — соотношение компонентов базовой нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 86/14 %, соответствующее максимальному расчетному значению p , постоянно в тройной смеси.

В табл. 1 приведены соотношения компонентов в разных рецептурах нанотермитной композиции, изучаемых в настоящей работе.

Расчет термодинамических параметров горения нанотермитных композиций (теплота Q , давление продуктов горения p) выполнял-

Таблица 1
Соотношение компонентов
в нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$

Рецептурная компоновка, %			
I	II	III	IV
82/15/3	85/12/3	85/12/3	82/13/5
77/18/5	84/11/5	84/11/5	80/13/7
73/20/7	83/10/7	82/11/7	77/13/10
67/23/10	81/9/10	79/11/10	73/12/15
57/28/15	77/8/15	75/10/15	71/12/17
—	—	—	69/11/20
—	—	—	68/11/21
—	—	—	67/11/22
—	—	—	64/11/25

ся с использованием программного комплекса REAL [38]. Моделировались условия адиабатического горения заряда в замкнутом объеме, плотность заряда принималась постоянной и равной 1.365 г/см^3 .

Относительная сила взрыва F определялась измерением амплитуды сигнала, зафиксированного осциллографом, при инициировании навески образца массой 15, 20, 30 мг на площадке одноточечного тензометрического датчика T24AM1-0,005 («Тензо-М», Россия). Проводилось по девять измерений амплитуды сигнала (по три на каждую навеску). Образец воспламенялся от искрового источника, представляющего собой два скрученных эмалированных медных провода диаметром 0.2 мм, сближенные концы которых касались поверхности навески исследуемой композиции. Базовый уровень (100 %) величины F соответствует взрыву нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ базового состава 88/12 % в компоновках I, III, для которых получено максимальное расчетное значение Q , и базового состава 86/14 % в компоновках II, IV, для которых получено максимальное расчетное значение p .

Скорость горения u нанотермитных композиций определялась ионизационным способом в зарядах двух типов:

1) заряд в полиэтиленовой трубке с внутренним диаметром 2 мм, толщиной стенки 1 мм, длиной 60 мм, поверх которой надеты сегменты полиэтиленовой трубки диаметром 4 мм, с толщиной стенки 1 мм, длиной $10 \div 12$ мм. Определение скорости горения осуществлялось на двух базах длиной $14 \div 15$ мм, первый датчик располагался на расстоянии около 15 мм от точки инициирования;

2) заряд в тонком слое — слой нанотермитной композиции толщиной 0.1 мм формировался между стальными пластинами шириной 10 мм и длиной 20 мм в стальной сборке, которая ограничивала боковой разлет продуктов горения; ионизационные датчики располагались на торцах заряда.

Все исследуемые образцы инициировались тепловым способом с одного из торцов заряда. Схема испытаний по определению скорости горения приведена в работе [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты измерения относительной силы взрыва нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ в различных рецептурных компоновках. Для компоновок I, III, IV характерен экстремальный характер зависимости силы взрыва от содержания добавки, при этом максимальное значение силы взрыва F_{max} достигается при содержании добавки 1Me-3H 5 % для компоновки I ($F_{\text{max}} = 122 \%$), 10 % для компоновки III ($F_{\text{max}} = 122 \%$), 21 % для компоновки IV ($F_{\text{max}} = 129 \%$). В случае компоновки II при содержании добавки до 5 % наблюдается снижение силы взрыва до 93 % от базового уровня, увеличение содержания 1Me-3H до 10 % приводит к росту F до базового уровня, дальнейшее повышение содержания 1Me-3H последовательно снижает значения F .

В табл. 2 представлены результаты измерения линейной скорости взрывчатого превращения u образцов нанотермитной композиции

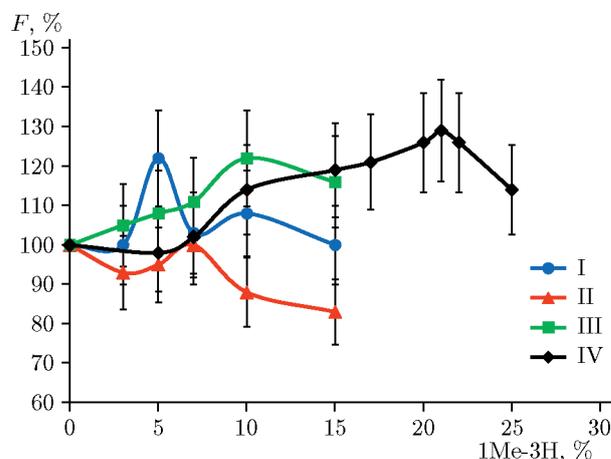


Рис. 1. Зависимость силы взрыва системы $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ в различных ее рецептурах от содержания добавки 1Me-3H

Таблица 2

Скорость горения нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ при различных ее рецептурах

Состав	Соотношение компонентов, %	TMD*, %	u , м/с	
			в трубке диаметром 2 мм	в слое толщиной 0.1 мм
$\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$	88/12	31	380 ÷ 480	210 ÷ 280
	86/14	28	400 ÷ 500	250 ÷ 300
Компоновка I $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$	77/18/5	35	400 ÷ 500	270 ÷ 320
	57/28/15	25	430 ÷ 530	250 ÷ 300
Компоновка II $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$	83/10/7	36	410 ÷ 510	150 ÷ 200
	77/8/15	36	440 ÷ 540	120 ÷ 170
Компоновка III $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$	79/11/10	39	450 ÷ 550	170 ÷ 220
	75/10/15	37	530 ÷ 630	270 ÷ 320
Компоновка IV $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$	68/11/21	37	590 ÷ 690	190 ÷ 250
	73/12/15	37	570 ÷ 670	380 ÷ 430

Примечание. *Доля от теоретически максимальной плотности.

Рис. 2. Внешний вид оболочек после измерения скорости горения нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$:

a — исходная пустая трубка, *б* — базовый нанотермит $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$, *в* — компоновка I, *г* — компоновка II, *д* — компоновка III, *е* — компоновка IV; внизу указано содержание 1Me-3H в композиции

$\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$. Исследовано по два состава каждой рецептурной компоновки: состав, отвечающий максимальному значению F ; состав с содержанием 1Me-3H 15 %.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что введение 1Me-3H позволяет увеличить скорость горения до 690 м/с в трубке (компоновка IV) и до 430 м/с в тонком слое (компоновка IV), что в полтора и более раза выше базового уровня (380 ÷ 500 м/с в трубке и 210 ÷ 300 м/с в тонком слое).

На рис. 2 представлен внешний вид оболочек после определения скорости горения композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ в компоновках I–IV. Согласно рис. 2 степень разрушения оболочки изменяется в следующем порядке: $I \leq II < III < IV$, что позволяет косвенно судить об увеличении «работоспособности» исследуемой композиции при изменении типа рецептуры.

Для описания полученных экспериментальных результатов за основу взята упрощенная модель конвективного горения в единич-

ной поре, которая использовалась для описания процессов горения в пористых высокоэнергетических материалах и подробно рассмотрена в работе [39].

В этой модели в качестве единичной поры выступает полая трубка, стенки которой выложены гетерогенным энергетическим материалом. В нашем случае стенки — «мозаика» из частиц Bi_2O_3 , Al и добавки 1Me-3H. Логично предположить, что при иницировании композиции первоначально протекает экзотермическая реакция нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$, в то время как вовлечение во взрывчатое превращение 1Me-3H происходит позже, поскольку плавление и первые стадии разложения этого вещества сопровождаются эндотермическими эффектами. Последующее энерговыделение зависит от полноты разложения добавки за время реакции нанотермитной пары. Таким образом, рост взрывчатых параметров возможен до тех пор, пока тепла от реакции нанотермитной пары достаточно для газификации добавки. Экстремальный характер зависимости этих параметров от содержания добавки можно объяснить следующим образом: до определенных концентраций полнота разложения добавки максимальна, что и приводит к росту взрывчатых параметров композиции, последующее снижение силы взрыва стоит связать с увеличением затрат энергии на разложение добавки, с одной стороны, а с другой — с уменьшением первичного тепловыделения от нанотермитной пары ввиду уменьшения ее содержания.

Рассматривая полученные экспериментальные данные с позиции модели горения в единичной поре, можно отметить определенные закономерности влияния рецептуры на взрывчатые характеристики нанотермитной композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$:

- максимальные взрывчатые параметры композиции достигаются при использовании компоновки типа IV. С точки зрения представленных выше позиций можно сказать, что в данных композициях тепловыделения от нанотермитной пары достаточно для разложения вводимой добавки и вовлечения части продуктов распада в экзотермические реакции взрывчатого превращения даже при относительно высоком (20 ÷ 23 %) содержании добавки.

- для компоновок I, III характерны приблизительно одинаковые значения взрывчатых параметров, при этом согласно результатам

исследования силы взрыва (см. рис. 1) предельная концентрация добавки в компоновке I составляет 5 %, а в компоновке III — 10 %.

Компоновка II наименее эффективна с точки зрения повышения взрывчатых характеристик нанотермитной композиции, в лучшем случае остается сохранить исследуемые параметры взрывчатого превращения на уровне базовой нанотермитной смеси.

ВЫВОДЫ

Рецептура композиции $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ оказывает существенное влияние на ее взрывчатые параметры. Максимальный эффект повышения силы взрыва F (до 129 % от базового уровня) отмечается при использовании компоновки IV и содержании 1Me-3H 21 %, построение рецептуры по типу компоновки II не приводит к повышению силы взрыва выше базового уровня. Степень разрушения оболочки при взрыве трубчатых зарядов отвечает этой зависимости: максимальные разрушения наблюдаются в случае компоновки IV, минимальные — в случае компоновки II. Высокий разброс значений скорости взрывчатого превращения в параллельных опытах не позволяет установить однозначных зависимостей, однако и здесь отмечается тенденция к повышению скорости при использовании компоновки IV (до 690 м/с по сравнению с 500 м/с базовой нанотермитной пары $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$).

Полученные результаты подтверждают высказанные предположения о ведущей и определяющей роли нанотермитной реакции в гетерогенных нанотермитных композициях с добавками, причем для максимального повышения силы взрыва соотношение компонентов нанотермита (Bi_2O_3 и Al) должно отвечать максимальному расчетному давлению, развиваемому при взрыве нанотермита в закрытом объеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Son S. F., Asay B. W., Foley T. J., Yetter R. A., Wu M. H., Risha G. A. Combustion of nanoscale Al/MoO₃ thermites in microchannels // J. Propul. Power. — 2007. — V. 23, N 4. — P. 715–721. — DOI: 10.2514/1.26090.
2. Zhang D., Li X., Qin B., Lai C., Guo X. Electrophoretic deposition and characterization of nano-Al/Fe₂O₃ thermites // Mater. Lett. — 2014. — V. 120. — P. 224–227. — DOI: 10.1016/j.matlet.2014.01.113.

3. **Sullivan K. T., Kuntz J. D., Gash A. E.** Electrophoretic deposition and mechanistic studies of nano-Al/CuO thermites // *J. Appl. Phys.* — 2012. — V. 112, N 2. — 024316. — DOI: 10.1063/1.4737464.
4. **Chiang Y.-C., Wu M.-H.** Assembly and reaction characterization of a novel thermite consisting aluminum nanoparticles and CuO nanowires // *Proc. Combust. Inst.* — 2017. — V. 36, N 3. — P. 4201–4208. — DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.176.
5. **Sanders V. E., Asay B. W., Foley T. J., Tappan B. C., Pacheco A. N., Son S. F.** Reaction propagation of four nanoscale energetic composites (Al/MoO₃, Al/WO₃, Al/CuO, and Bi₂O₃) // *J. Propul. Power.* — 2007. — V. 23, N 4. — P. 707–714. — DOI: 10.2514/1.26089.
6. **Pantoya M. L., Granier J. J.** Combustion behavior of highly energetic thermites: nano versus micron composites // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2005. — V. 30, N 1. — P. 53–62. — DOI: 10.1002/prop.200400085.
7. **Subramaniam S., Hasan S., Bhat-tacharya S., Gao Y., Apperson S., Hos-sain M., Shende R., Gangopadhyay S., Redner P., Kapoor D., Nicolich S.** Self-assembled nanoenergetic composite // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* — 2006. — V. 896. — 0896-H01-05.1. — DOI: 10.1557/PROC-0896-H01-05.
8. **Рогачев А. С., Мукасьян А. С.** Горение гетерогенных наноструктурных систем (обзор) // *Физика горения и взрыва.* — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 3–30.
9. **Weir C., Pantoya M. L., Daniels M. A.** The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials // *Combust. Flame.* — 2013. — V. 160, N 10. — P. 2279–2281. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.05.005.
10. **Piercey D. G., Klapötke T. M.** Nanoscale aluminum — metal oxide (thermite) reactions for application in energetic materials // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2010. — V. 7, N 2. — P. 115–129.
11. **Kelly D. G., Beland P., Brousseau P., Petre C.-F.** Formation of additive-containing nanothermites and modifications to their friction sensitivity // *J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 35, N 3. — P. 331–345. — DOI: 10.1080/07370652.2016.1193072.
12. **Zhou X., Shen R., Ye Y., Zhu P., Hu Y., Wu L.** Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator // *J. Appl. Phys.* — 2011. — V. 110, N 9. — 094505. — DOI: 10.1063/1.3658617.
13. **Zhu P., Shen R., Ye Y., Zhu X., Hu Y.** Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films // *J. Appl. Phys.* — 2011. — V. 110, N 7. — 074513. — DOI: 10.1063/1.3646489.
14. **Ru C., Wang F., Xu J., Dai J., Shen Y., Ye Y., Zhu P., Shen R.** Superior performance of a MEMS-based solid propellant microthruster (SPM) array with nanothermites // *Microsystem Technol.* — 2017. — V. 23, N 8. — P. 3161–3174. — DOI: 10.1007/s00542-016-3159-x.
15. **Staley C. S., Raymond K. E., Thiruvengadathan R., Apperson S. J., Gangopadhyay K., Swaszek S. M., Taylor R. J., Gangopadhyay S.** Fast-impulse nanothermite solid-propellant miniaturized thrusters // *J. Propul. Power.* — 2013. — V. 29, N 6. — P. 1400–1409. — DOI: 10.2514/1.B34962.
16. **Apperson S. J., Bezmelnitsyn A. V., Thiruvengadathan R., Gangopadhyay K., Gangopadhyay S., Balas W. A., Anderson P. E., Nicolich S. M.** Characterization of nanothermite material for solid-fuel microthruster applications // *J. Propul. Power.* — 2009. — V. 25, N 5. — P. 1086–1091. — DOI: 10.2514/1.43206.
17. **Steelman R., Clark B., Pantoya M. L., Heaps R. J., Daniels M. A.** Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition // *J. Electrostatics.* — 2015. — V. 76. — P. 102–107. — DOI: 10.1016/j.elstat.2015.05.008.
18. **Yan N., Qin L., Hao H., Hui L., Zhao F., Feng H.** Iron oxide/aluminum/graphene energetic nanocomposites synthesized by atomic layer deposition: Enhanced energy release and reduced electrostatic ignition hazard // *Appl. Surf. Sci.* — 2017. — V. 408. — P. 51–59. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.169.
19. **Thiruvengadathan R., Staley C., Geeson J. M., Chung S., Raymond K. E., Gangopadhyay K., Gangopadhyay S.** Enhanced combustion characteristics of bismuth trioxide-aluminum nanocomposites prepared through graphene oxide directed self-assembly // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2015. — V. 40, N 5. — P. 729–734. — DOI: 10.1002/prop.201400238.
20. **Bach A., Gibot P., Vidal L., Gadiou R., Spitzer D.** Modulation of the reactivity of a WO₃/Al energetic material with graphitized carbon black as additive // *J. Energ. Mater.* — 2015. — V. 33, N 4. — P. 260–276. — DOI: 10.1080/07370652.2014.977979.
21. **Siegert B., Comet M., Muller O., Pourroy G., Spitzer D.** Reduced-sensitivity nanothermites containing manganese oxide filled carbon nanofibers // *J. Phys. Chem. C.* — 2010. — V. 114, N 46. — P. 19562–19568. — DOI: 10.1021/jp1014737.
22. **Thiruvengadathan R., Chung S. W., Basuray S., Balasubramanian B., Staley C. S., Gangopadhyay K., Gangopadhyay S.** A versatile self-assembly approach toward high performance nanoenergetic composite using functionalized graphene // *Langmuir.* — 2014. — V. 30, N 22. — P. 6556–6564. — DOI: 10.1021/la500573e.

23. **Gibot P., Bach A., Vidal L., Schnell F., Gadiou R., Spitzer D.** Safer and performing energetic materials based on polyaniline-doped nanocomposites // *J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 35, N 2. — P. 136–147. — DOI: 10.1080/07370652.2016.1210697.
24. **Foley T., Pacheco A., Malchi J., Yetter R., Higa K.** Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2007. — V. 32, N 6. — P. 431–434. — DOI: 10.1002/prop.200700273.
25. **Gordeev V. V., Kazutin M. V., Kozyrev N. V.** Effect of additives on CuO/Al nanothermite properties // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2017. — V. 894. — 012116. — DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012116.
26. **Dai J., Xu J., Wang F., Tai Y., Shen Y., Shen R., Ye Y.** Facile formation of nitrocellulose-coated Al/Bi₂O₃ nanothermites with excellent energy output and improved electrostatic discharge safety // *Mater. Des.* — 2018. — V. 143. — P. 93–103. — DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.056.
27. **Luo Q., Liu G., Zhu M., Jiang X.** Constant volume combustion properties of Al/Fe₂O₃/RDX nanocomposite: the effects of its particle size and chemical constituents // *Combust. Flame.* — 2022. — V. 238. — 111938. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111938.
28. **Qiao Z., Shen J., Wang J., Huang B., Yang Z., Yang G., Zhang K.** Fast deflagration to detonation transition of energetic material based on a quasi-core/shell structured nanothermite composite // *Compos. Sci. Technol.* — 2015. — V. 107. — P. 113–119. — DOI: 10.1016/j.compscitech.2014.12.005.
29. **Zhang Z., Shen Y., Wang C., Wang Y., Li F., Cheng J., Xu J., Ye Y., Shen R.** An excellent synergy between Cl-20 and nanothermites in flaming and propelling with high specific impulse and superior safety to electrostatic discharge // *Combust. Flame.* — 2022. — V. 240. — 112024. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2022.112024.
30. **Wang H., Zachariah M. R., Xie L., Rao G.** Ignition and combustion characterization of nano-Al-AP and nano-Al-CuO-AP micro-sized composites produced by electrospray technique // *Energy Procedia.* — 2015. — V. 66. — P. 109–112. — DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.063.
31. **Dai J., Wang F., Ru C., Xu J., Wang C., Zhang W., Ye Y., Shen R.** Ammonium perchlorate as an effective additive for enhancing the combustion and propulsion performance of Al/CuO nanothermites // *J. Phys. Chem. C.* — 2018. — V. 122, N 18. — P. 10240–10247. — DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b01514.
32. **Luo Q., Long X., Nie D., Liu G., Wu C.** Deflagration to detonation transition in weakly confined conditions for a type of potentially novel green primary explosive: Al/Fe₂O₃/RDX hybrid nanocomposites // *Defence Technol.* — 2023. — V 22. — P. 28–36. — DOI: 10.1016/j.dt.2021.11.011.
33. **Gordeev V. V., Kazutin M. V., Kozyrev N. V.** Effect of nitrocellulose and 1-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole on properties of CuO/Al and Bi₂O₃/Al nanothermites // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2020. — V. 1666, N 1. — 012014. — DOI: 10.1088/1742-6596/1666/1/012014.
34. **Гордеев В. В., Казутин М. В., Козырев Н. В.** Влияние рецептурной компоновки на силу взрыва нанотермитной композиции CuO/Al/1Me-3H // *Южно-Сиб. науч. вестн.* — 2021. — № 5(39). — С. 138–143. — DOI: 10.25699/SSSB.2021.39.5.005
35. **Гордеев В. В., Казутин М. В., Козырев Н. В.** Исследование взрывчатых параметров нанотермитной композиции MoO₃/Al/1Me-3H в зависимости от рецептурных факторов // *Южно-Сиб. науч. вестн.* — 2020. — № 6(34). — С. 183–188. — DOI: 10.25699/o2048-7638-2008-j.
36. **Гордеев В. В., Казутин М. В., Козырев Н. В.** Влияние добавки 1Me-3H на силу взрыва нанотермитных систем SnO₂/Al и WO₃/Al // *Южно-Сиб. науч. вестн.* — 2021. — № 6(40). — С. 252–258. — DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.038.
37. **Sukhanov G. T., Lukin A. Yu.** Reaction of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives with alkylating agents. 1. Alkylation in the presence of alkali // *Chem. Heterocycl. Compd.* — 2005. — V. 41, N 7. — P. 861–865. — DOI: 10.1007/s10593-005-0239-8.
38. **Белов Г. В.** Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы. — М.: Науч. мир, 2002.
39. **Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В.** Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 09.11.2022.

Принята к публикации 14.12.2022.