

ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНОЙ КОМПОНОВКИ НА СИЛУ ВЗРЫВА НАНОТЕРМИТНОЙ КОМПОЗИЦИИ $\text{CuO}/\text{Al}/1\text{Me-3H}$

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

Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск

Синтезированное в ИПХЭТ СО РАН низкочувствительное высокоэнергетическое вещество 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Me-3H) рассматривается как перспективная добавка, способная увеличить силу взрыва нанотермитных композиций. В работе приведены результаты исследования силы взрыва (F) нанотермитной композиции $\text{CuO}/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ в зависимости от содержания 1Me-3H. Исследован ряд составов различной рецептурной компоновки: I – соотношение компонентов тройной смеси $\text{CuO}/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ соответствовало максимальной расчетной теплоте взрыва композиции (Q) при заданном содержании 1Me-3H; II – соотношение компонентов тройной смеси соответствовало максимальному расчетному значению давления (P), развиваемому при горении композиции в замкнутом объеме; III – соотношение компонентов базовой нанотермитной пары CuO/Al (79/21 % масс.), соответствующее максимальному расчетному значению Q, оставалось постоянным в тройной смеси; IV – соотношение компонентов базовой нанотермитной пары CuO/Al (76/24 % масс.), соответствующее максимальному расчетному значению P, оставалось постоянным в тройной смеси. Для всех типов компоновки выявлен экстремальный характер зависимости силы взрыва от содержания 1Me-3H, при этом максимальные значения F наблюдаются при содержании добавки 5 % для компоновки I (F = 107 %), 10 % для компоновки II (F = 128 %), 25 % для компоновки III (F = 151 %) и 30 % для компоновки IV (F = 147 %).

Ключевые слова: нанотермиты, рецептурная компоновка, сила взрыва.

ВВЕДЕНИЕ

Нанотермиты рассматриваются как перспективный материал для создания пиротехнических микрорелектромеханических устройств (MEMS) [1–5]. Однако использование нанотермитных смесей в «чистом» виде осложнено из-за их высокой чувствительности к трению и электрической искре [6–8]. В связи с чем нанотермитные смеси модифицируются добавками различной природы. Использование углеродных материалов [9–12] позволяет снизить чувствительность нанотермитных композиций к электрической искре и трению, при этом взрывчатые параметры как правило, снижаются. Есть и исключения: добавка оксида графита позволяет увеличить скорость горения и удельный импульс системы $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}$. Введение таких материалов, как дисульфид молибдена, полианилин, фторполимер марки Viton A, изопреновый каучук (СКИ-НЛ) [8,13–15], флегматизирует нанотермитные композиции, но снижают их взрывчатые характеристики относительно базовых смесей, вплоть до потери способности горения в тонком слое (0,1 мм). Добавки высокоэнергетических материалов (нитроцеллюлоза, гексоген, перхлорат аммония) [4,16–19] позволяют значительно увеличить взрывчатые параметры, при этом в некоторых случаях (композиции с нитроцеллюлозой, гексогеном) наблюдается снижение чувствительности. Однако рост взрывчатых параметров возможен только до

определенной концентрации добавки, после чего экспериментальные взрывчатые свойства снижаются.

Таким образом понимание природы взрывчатого взаимодействия различных материалов с нанотермитами, а также развитие представлений о механизмах горения подобных систем является актуальной задачей.

Синтезированный в ИПХЭТ СО РАН высокоэнергетический материал 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол [20] (1Me-3H) – низкомолекулярное кристаллическое вещество с энтальпией образования $\Delta H = 1,63$ кДж/г, рассматривается как перспективная добавка в составах нанотермитных композиций. В нашей работе [21] была рассмотрено влияние 1Me-3H на свойства композиции $\text{MoO}_3/\text{Al}/1\text{Me-3H}$ при двух различных рецептурных компоновках составов: исследованы составы, в которых соотношение MoO_3/Al оставалось постоянным в тройной смеси; и составы, в которых соотношение MoO_3/Al в тройной смеси подбирались таким, чтобы расчетное значение теплоты взрыва Q было максимальным для тройной смеси. Показано, что экспериментальное значение сила взрыва F первых в несколько раз выше вторых. Для составов с постоянным соотношением MoO_3/Al максимуму силы взрыва достигается при содержании 30 % 1Me-3H, для составов, подобранных по критерию максимальной расчетной теплоты Q максимум F, достигается при содержании 15 % 1Me-3H. В продолжение этих исследований в настоящей статье рассматривается влияние рецептурной компоновки на взрывчатые параметры композиции $\text{CuO}/\text{Al}/1\text{Me-3H}$.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для наработки нанотермитных композиций использовались следующие материалы:

- Оксид меди CuO («Плазмотерм», Россия) – средний размер частиц 60–110 нм, содержание основного вещества 99,9 %;
- Алюминий Al («Передовые порошковые технологии», Россия) – марка «Аlex», размер частиц 50-100 нм, содержание основного вещества 78 %;
- 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Ме-3Н) – малочувствительное высокоэнергетическое вещество брутто-формулы C₃H₄N₄O₂, температура плавления T_{пл} ≈ 65 °С, температура разложения T_{разл} ≈ 240–250 °С.

Порядок изготовления нанотермитных композиций описан в работах [21,22].

Компоновка рецептур исследуемой нанотермитной композиции осуществлялась по следующим принципам:

I. Соотношение компонентов CuO/Al/1Ме-3Н соответствовало максимальной расчетной теплоте взрыва (Q) композиции при заданном содержании 1Ме-3Н;

II. Соотношение компонентов CuO/Al/1Ме-3Н соответствовало максимальному расчетному значению давления (P), развиваемому при горении композиции в замкнутом объеме;

III. Соотношение компонентов базовой нанотермитной пары CuO/Al (79/21 %, что соответствует максимальному расчетному значению Q) оставалось неизменным в тройных смесях CuO/Al/1Ме-3Н;

IV. Соотношение CuO/Al (76/24 %, что соответствует максимальному расчетному значению P) оставалось неизменным в тройных смесях CuO/Al/1Ме-3Н.

В таблице 1 представлены составы композиций, изученных в данной работе, которые были подобраны на основе расчетов с использованием программного комплекса REAL [23].

Табл. 1. Составы композиции CuO/Al/1Ме-3Н

Рецептурная компоновка			
I	II	III	IV
70/25/5	74/21/5	75/20/5	72/23/5
60/30/10	73/17/10	71/19/10	68/22/10
51/34/15	69/16/15	67/18/15	65/20/15
42/38/20	66/14/20	63/17/20	61/19/20
24/46/30	-	59/16/25	57/18/25
-	-	55/15/30	53/17/30
-	-	-	49/16/35

Методика измерения относительной силы взрыва F (%) подробно описана в работе [21]. Измерения проводились с использованием тензометрического датчика T24AM1-0,005 («Тензо-М», Россия). За базовый уровень величины F (100 %) принято

экспериментальное значение, соответствующее нанотермитной паре CuO/Al 76/24 %.

На рисунке 1 представлены результаты измерений силы взрыва нанотермитной композиции CuO/Al/1Ме-3Н при различных рецептурных компоновках.

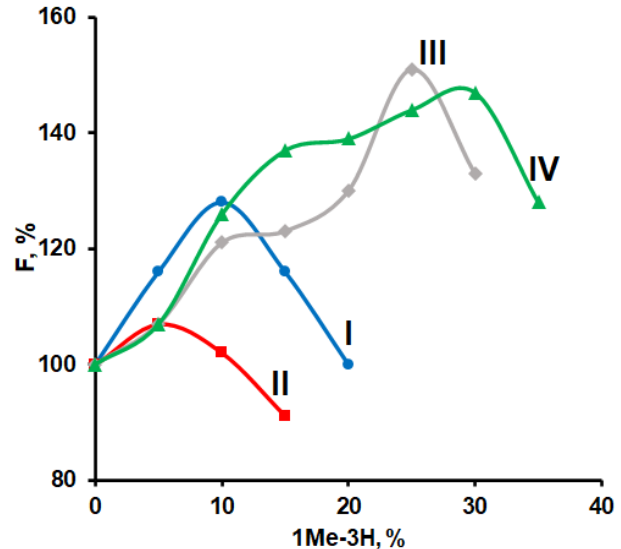


Рис. 1. Зависимость силы взрыва нанотермитной композиции от содержания 1Ме-3Н

Зависимость силы взрыва композиции от содержания добавки имеет экстремальный характер, где максимальное значение F достигается при содержании 1Ме-3Н: 5 % для компоновки I (F = 107 %), 10 % для компоновки II (F = 128 %), 25 % для компоновки III (F = 151 %), 30 % для компоновки IV (F = 147 %).

Важно отметить, что при содержании добавки 20 % для компоновки II и 30 % для компоновки I удастся инициировать навеску исследуемой композиции, но датчик не фиксирует изменение силы взрыва. Для компоновок III и IV при содержании добавки 30 и 35 % получается измерить силу взрыва только при взрыве навесок от 20 и 30 мг соответственно: вызвать взрыв меньших количеств низкоэнергетическим искровым воздействием не удастся.

На рисунке 2 приведены расчетные значения теплоты горения (Q) и давления (P), развиваемого при горении композиции CuO/Al/1Ме-3Н в замкнутом объеме, при различной рецептурной компоновке. Согласно графикам на рисунке 2, при использовании компоновки I нанотермитная композиция обладает наибольшей теплотой горения (рис 2 а), при этом давление (рис 2 б), создаваемое системой, ниже, чем у других компоновок. Обратная ситуация наблюдается при использовании компоновки II, для которой характерна максимальная газопроизводительность, но самая низкая теплотворная способность из рассматриваем рецептурных компоновок.

Компоновки III и IV обладают приблизительно равными параметрами теплоты и давления, значения которых находятся в области между компоновками I и II для обоих расчетных параметров – Q и P.

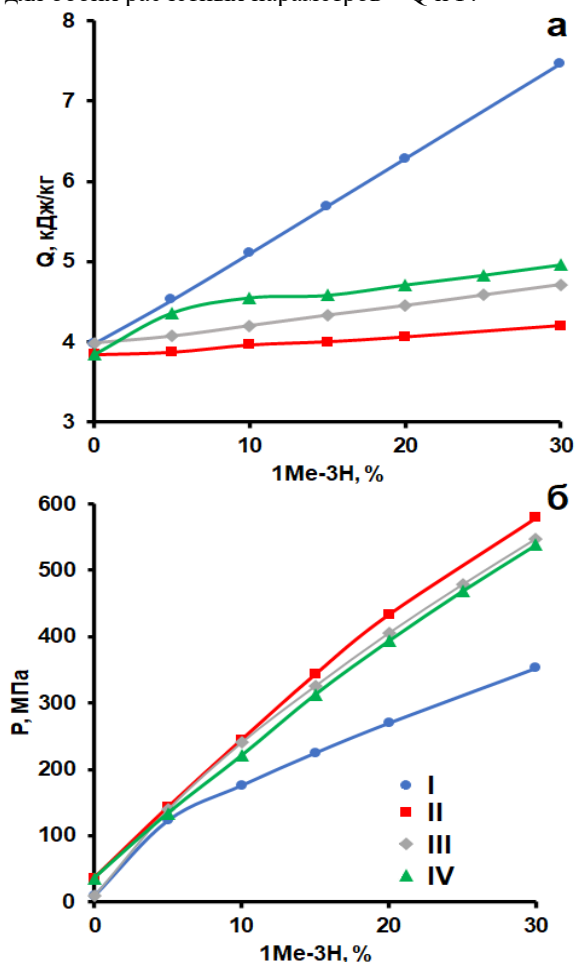


Рис. 2. Зависимости расчетных значений Q (а) и P (б) от содержания 1Me-3H в нанотермитной композиции

Для описания полученных расчетных и экспериментальных данных, как и в предыдущих работах [21,24,25], используется модель конвективного горения в единичной поре [26,27] – условной трубке, стенки которой выложены реакционноспособным материалом. В случае нанотермитной композиции стенки поры состоят из «мозаики» частиц CuO, Al и добавки 1Me-3H. Логично предположить, что при инициировании композиции первоначально протекает экзотермическая реакция нанотермитной пары CuO/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 протекания реакции нанотермитной пары. Таким образом рост силы взрыва F возможен до тех пор, пока тепла от

нанотермитной пары достаточно для полного разложения добавки. При достижении некоторой предельной концентрации 1Me-3H сила взрыва снижается ввиду увеличения первичных затрат энергии на разложение вводимой добавки с одной стороны, и снижения уровня первичного тепловыделения из-за снижения содержания основного источника его источника – нанотермитной пары CuO/Al – с другой.

Рассматривая полученные расчетные и экспериментальные данные с позиции модели горения в единичной поре, можно отметить определенные закономерности влияния рецептурной компоновки на взрывчатые свойства нанотермитной композиции CuO/Al/1Me-3H, в т. ч.:

- максимальная сила взрыва (151 и 147 % от базового уровня) достигается при компоновках по типу III и IV. С рассмотренных выше позиций следует, что в данных композициях тепловыделения нанотермитной пары достаточно для разложения 1Me-3H и вовлечения части продуктов распада в экзотермические реакции взрывчатого превращения даже при относительно высоком (20–30 %) содержании добавки. Трудности инициирования составов этих компоновок в навесках менее 20–30 мг косвенно свидетельствуют о снижении чувствительности (базовый нанотермит CuO/Al способен к взрыву в навесках от 1 мг);

- в случае рецептурной компоновки I отмечается резкий рост силы взрыва F с введением 1Me-3H до 10 %, при котором отмечается максимальная сила взрыва - 128 % от базового уровня, после которого столь же резкое падение до базовой величины (100 %) при содержании 1Me-3H 20 %;

- компоновка композиций CuO/Al/1Me-3H по типу II наименее эффективна с точки зрения повышения взрывчатых характеристик – максимально возможная сила взрыва, 107 %, достигается при содержании добавки 5 %, после чего снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рецептурная компоновка нанотермитных композиций существенно влияет на взрывчатые характеристики последних: в композициях CuO/Al/1Me-3H, построенных по разным принципам, экспериментальная сила взрыва микронавески может составлять от 107 % (компоновка II) до 151 % (компоновка III) относительно силы взрыва базовой нанотермитной пары. Сопоставляя полученные в настоящей работе экспериментальные и расчетные данные с данными работы [21], можно уверенно утверждать, что при взрывах микронавесок нанотермитных композиций, содержащих добавку 1Me-3H, максимальная сила взрыва соответствует рецептурным компоновкам, построенным по принципам постоянства соотношения компонентов двойной нанотермитной смеси (CuO/Al в настоящей

работе и MoO_3/Al в работе [21]). Сила взрыва определяется с одной стороны, первичным тепловыделением наиболее реакционноспособных компонентов (нанотермитной пары), а с другой – легкостью разложения добавки и способностью продуктов ее распада увеличить экзотермический эффект реакций взрывчатого превращения.

Результаты, представленные в настоящей работе, могут быть полезны при разработке нанотермитных композиций практического применения.

Работа выполнена в рамках проекта по бюджетному финансированию № 0308-2021-0005 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Zhou X. et al. "Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator", *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 9, pp. 094505, 2011.
- Zhu P. et al. "Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films", *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 7, pp. 074513, 2011.
- Ru C. et al. "Superior performance of a MEMS-based solid propellant microthruster (SPM) array with nanothermites", *Microsyst. Technol.*, Vol. 23, № 8, pp. 3161–3174, 2017.
- Staley C.S. et al. "Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters", *J. Propuls. Power.*, Vol. 29, № 6, pp. 1400–1409, 2013.
- Apperson S.J. et al. "Characterization of Nanothermite Material for Solid-Fuel Microthruster Applications", *J. Propuls. Power.*, Vol. 25, № 5, pp. 1086–1091, 2009.
- Piercey D.G. and T.M. Klapötke "Nanoscale Aluminum - Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials", *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 7, № 2, pp. 115–129, 2010.
- Weir C., M.L. Pantoya and M.A. Daniels "The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials", *Combust. Flame.*, Vol. 160, № 10, pp. 2279–2281, 2013.
- Kelly D.G. et al. "Formation of Additive-Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity", *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 3, pp. 331–345, 2016.
- Steelman R. et al. "Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition", *J. Electrostat.*, Vol. 76, pp. 102–107, 2015.
- Yan N. et al. "Iron oxide/aluminum/graphene energetic nanocomposites synthesized by atomic layer deposition: Enhanced energy release and reduced electrostatic ignition hazard" *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 408, pp. 51–59, 2017.
- Thiruvengadathan R. et al. "Enhanced Combustion Characteristics of Bismuth Trioxide-Aluminum Nanocomposites Prepared through Graphene Oxide Directed Self-Assembly" *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 40, № 5, pp. 729–734, 2015.
- Bach A. et al. "Modulation of the Reactivity of a WO_3/Al Energetic Material with Graphitized Carbon Black as Additive" *J. Energ. Mater.*, Vol. 33, № 4, pp. 260–276, 2015.
- Gibot P. et al. "Safer and Performing Energetic Materials Based on Polyaniline-Doped Nanocomposites", *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 2, pp. 136–147, 2016.
- Foley T. et al. "Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds", *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 32, № 6, pp. 431–434, 2007.
- Gordeev V.V., M.V. Kazutin and N.V. Kozыrev "Effect of additives on CuO/Al nanothermite properties" *J. Phys. Conf. Ser.* Vol. 894, № 1, pp. 012116, 2017.
- Dai J. et al. "Facile formation of nitrocellulose-coated Al/ Bi_2O_3 nanothermites with excellent energy output and improved electrostatic discharge safety" *Mater. Des.*, Vol. 143, pp. 93–103, 2018.
- Wang H. et al. "Ignition and Combustion Characterization of Nano-Al-AP and Nano-Al-CuO-AP Micro-sized Composites Produced by Electro-spray Technique", *Energy Procedia.*, Vol. 66, pp. 109–112, 2015.
- Dai J. et al. "Ammonium Perchlorate as an Effective Additive for Enhancing the Combustion and Propulsion Performance of Al/CuO Nanothermites", *J. Phys. Chem. C.*, Vol. 122, № 18, pp. 10240–10247, 2018.
- Qiao Z. et al. "Fast deflagration to detonation transition of energetic material based on a quasi-core/shell structured nanothermite composite" *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 107, pp. 113–119, 2015.
- Sukhanov G.T. and A.Y. Lukin "Reaction of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives with alkylating agents. 1. Alkylation in the presence of alkali" *Chem. Heterocycl. Compd.*, Vol. 41, № 7, pp. 861–865, 2005.
- Gордеев В.В. Исследование взрывчатых параметров нанотермитной композиции $\text{MoO}_3/\text{Al}/1\text{Me}-3\text{H}$ в зависимости от рецептурных факторов / В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-сибирский научный вестник. - 2020. - № 6 (34). - С. 183–188.
- Гордеев В.В. Исследование влияния производных нитротриазола на взрывчатые свойства нанотермита CuO/Al / В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-сибирский научный вестник. - 2020. - № 6 (34). - С. 28–33.
- Белов Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы [Текст] / Г.В. Белов. - Научный ми. М., 2002. - 184 с.
- Гордеев В.В. Исследование свойств нанотермита CuO/Al с добавками нитротриазолов / В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-Сибирский Научный Вестник. - 2018. - № 4 (24). - С. 339–345.
- Гордеев В.В. Исследование свойств нанотермита $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Al}$ и композиций на его основе / В.В. Гордеев, М.В. Казутин, Н.В. Козырев, В.Н. Комов // Южно-Сибирский Научный Вестник. - 2018. - № 4 (24). - С. 261–268.
- Переход горения конденсированных систем во взрыв [Текст] / Беляев А.Ф. [и др.], под ред. П.Ф. Похил. - М.: Наука, 1973. - 292 с.
- Храповский В.Е. О механизме конвективного горения пористых систем / В.Е. Храповский, А.А. Сулимов // Физика горения и взрыва. - 1988. - Т. 2. - С. 39–44.

Гордеев Владимир Вячеславович – младший научный сотрудник лаборатории № 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854) 30-18-66, e-mail: gordeev.vladimir92@yandex.ru

Казутин Максим Владимирович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории № 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854) 30-14-33, e-mail: iphet@rambler.ru.

Козырев Николай Владимирович – д.т.н., заведующий лабораторией № 4, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854) 30-58-05, e-mail: kozyrev@ipcet.ru.

EFFECT OF PRESCRIPTION CONFIGURATION ON EXPLOSIVE FORCE NANOTHERMITE COMPOSITION CUO/AL/1ME-3H

V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N. V. Kozyrev

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk

The low-sensitivity high-energy substance 1-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole (1Me-3H), synthesized at the IPCET SB RAS, is considered as a promising additive capable of increasing the explosion force of nanothermitic compositions. The paper presents the results of a study of the explosion force (F) of the nanothermitic composition CuO / Al / 1Me-3H, depending on the content of 1Me-3H. A number of compositions of various prescription configurations were investigated: I - the ratio of the components of the ternary mixture CuO/Al/1Me-3H corresponded to the maximum calculated heat of explosion of the composition (Q) at a given content of 1Me-3H; II - the ratio of the components of the ternary mixture corresponded to the maximum calculated value of the pressure (P) developed during the combustion of the composition in a closed volume; III — the ratio of the components of the base nanothermite pair CuO/Al (79/21 %), corresponding to the maximum calculated value of Q, remained constant in the ternary mixture; IV - the ratio of the components of the base nanothermite pair CuO / Al (76/24 %), corresponding to the maximum calculated value of P, remained constant in the ternary mixture. For all types of prescription configurations, an extreme nature of the dependence of the force explosion on the content of 1Me-3H was revealed, while the maximum values of F are observed at an additive content of 5% for configuration I (F = 107%), 10% for configuration II (F = 128%), 25% for configuration III (F = 151%) and 30% for configuration IV (F = 147%).

Keyword: nanothermite, prescription configuration, explosion force.

REFERENCES

1. Zhou X. et al. "Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator", *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 9, pp. 094505, 2011.
2. Zhu P. et al. "Energetic igniters realized by integrating Al/CuO reactive multilayer films with Cr films", *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 7, pp. 074513, 2011.
3. Ru C. et al. "Superior performance of a MEMS-based solid propellant microthruster (SPM) array with nanothermites", *Microsyst. Technol.*, Vol. 23, № 8, pp. 3161–3174, 2017.
4. Staley C.S. et al. "Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters", *J. Propuls. Power.*, Vol. 29, № 6, pp. 1400–1409, 2013.
5. Apperson S.J. et al. "Characterization of Nanothermite Material for Solid-Fuel Microthruster Applications", *J. Propuls. Power.*, Vol. 25, № 5, pp. 1086–1091, 2009.
6. Piercey D.G. and T.M. Klapötke "Nanoscale Aluminum - Metal Oxide (Thermite) Reactions for Application in Energetic Materials", *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 7, № 2, pp. 115–129, 2010.
7. Weir C., M.L. Pantoya and M.A. Daniels "The role of aluminum particle size in electrostatic ignition sensitivity of composite energetic materials", *Combust. Flame.*, Vol. 160, № 10, pp. 2279–2281, 2013.
8. Kelly D.G. et al. "Formation of Additive-Containing Nanothermites and Modifications to their Friction Sensitivity", *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 3, pp. 331–345, 2016.
9. Steelman R. et al. "Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition", *J. Electrostat.*, Vol. 76, pp. 102–107, 2015.
10. Yan N. et al. "Iron oxide/aluminum/graphene energetic nanocomposites synthesized by atomic layer deposition: Enhanced energy release and reduced electrostatic ignition hazard" *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 408, pp. 51–59, 2017.
11. Thiruvengadathan R. et al. "Enhanced Combustion Characteristics of Bismuth Trioxide-Aluminum Nanocomposites Prepared through Graphene Oxide Directed Self-Assembly" *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 40, № 5, pp. 729–734, 2015.
12. Bach A. et al. "Modulation of the Reactivity of a WO₃/Al Energetic Material with Graphitized Carbon Black as Additive" *J. Energ. Mater.*, Vol. 33, № 4, pp. 260–276, 2015.
13. Gibot P. et al. "Safer and Performing Energetic Materials Based on Polyaniline-Doped Nanocomposites", *J. Energ. Mater.*, Vol. 35, № 2, pp. 136–147, 2016.
14. Foley T. et al. "Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds", *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 32, № 6, pp. 431–434, 2007.
15. Gordeev V.V., M.V. Kazutin and N.V. Kozyrev "Effect of additives on CuO/Al nanothermite properties" *J. Phys. Conf. Ser.* Vol. 894, № 1, pp. 012116, 2017.
16. Dai J. et al. "Facile formation of nitrocellulose-coated Al/Bi₂O₃ nanothermites with excellent energy output and improved electrostatic discharge safety" *Mater. Des.*, Vol. 143, pp. 93–103, 2018.
17. Wang H. et al. "Ignition and Combustion Characterization of Nano-Al-AP and Nano-Al-CuO-AP Micro-sized Composites Produced by Electro Spray Technique", *Energy Procedia.*, Vol. 66, pp. 109–112, 2015.
18. Dai J. et al. "Ammonium Perchlorate as an Effective Additive for Enhancing the Combustion and Propulsion Performance of Al/CuO Nanothermites", *J. Phys. Chem. C.*, Vol. 122, № 18, pp. 10240–10247, 2018.
19. Qiao Z. et al. "Fast deflagration to detonation transition of energetic material based on a quasi-core/shell structured nanothermite composite" *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 107, pp. 113–119, 2015.
20. Sukhanov G.T. and A.Y. Lukin "Reaction of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives with alkylating agents. 1. Alkylation in the presence of alkali" *Chem. Heterocycl. Compd.*, Vol. 41, № 7, pp. 861–865, 2005.
21. Gordeev V.V. Study combustion performance nanothermite composition MoO₃/Al/1Me-3H on the prescription factors / V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev // South-Siberian Scientific Bulletin.- 2020. № 6 (34). - P. 183–188.

22. Gordeev V.V. Effect of 3-nitro-1,2,4-triazole derivatives on combustion performance of CuO/Al / V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev // South-Siberian Scientific Bulletin. - 2020. - № 6 (34). - С. 28–33.
23. Belov G.V. 2002 *Termodinamicheskoye modelirovaniye: metody, algoritmy, programmy* [Thermodynamics modeling: methods, algorithms, programs] (Moscow: Nauchnyi Mir) p. 184
24. Gordeev V.V. A study of properties of CuO/Al nanothermite doped with nitrotriazoles / V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev // South-Siberian Scientific Bulletin. - 2018. - № 4 (24). - P. 339–345.
25. Gordeev V.V. A study of properties of Bi₂O₃/Al nanothermite and its composites / V.V. Gordeev, M.V. Kazutin, N.V. Kozyrev, V.N. Komov // South-Siberian Scientific Bulletin. - 2018. - № 4 (24). - P. 261–268.
26. Belyaev A.F. et al., ed. Pohl P.F. 1973 *Perehod gorennya kondensirovannyh sistem vo vzryv* [Combustion transition of condensed systems to explosion] (Moscow: Nauka) p. 292.
27. Hrapovskiy V.E. On the mechanism of convective combustion of porous systems / V.E. Hrapovskiy, A.A. Sulimov // Combustion, Explosion, and Shock Waves. - 1988. - Vol. 2. - P. 39–44.

Gordeev Vladimir Vyacheslavovich: Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), research scientist at the Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, 659322 Biysk, Altai krai, ul. Socialisticheskaya 1. E-mail: gordeev.vladimir92@yandex.ru. Work phone: 8-(3854)-30-18-66.

Kazutin Maxim Vladimirovich: Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), candidate of engineering sciences, senior research scientist at the Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, 659322 Biysk, Altai krai, ul. Socialisticheskaya 1. E-mail: iphet@rambler.ru Work phone: 8-(3854)-30-14-33.

Kozyrev Nicolay Vladimirovich: Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), doctor of engineering sciences, head of the Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, 659322 Biysk, Altai krai, ul. Socialisticheskaya 1. E-mail: kozyrev@ipcet.ru Work phone: 8-(3854)-30-58-05.