

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ НИТРОТРИАЗОЛА НА ВЗРЫВЧАТЫЕ СВОЙСТВА НАНОТЕРМИТА CuO/Al

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

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

В работе рассмотрены взрывчатые характеристики нанотермитных композиций CuO/Al /добавка, где в качестве добавки используются высокоэнергетические материалы, ряд производных нитротриазола - 1Ме-3Н, Т-3Н, Э-3Н. Введение данных материалов позволяет увеличить силу взрыва (F) до 185 %, а скорость горения в трубке ($d = 2$ мм) до 850 м/с, в тонком слое (0,1 мм) до 350 м/с. Для всех исследуемых композиций характерен экстремальный характер зависимости силы взрыва от содержания добавки, при этом предельные значения F наблюдаются при содержании 1Ме-3Н – 15 %, Т-3Н и Э-3Н – 10 %. Установлено, что влияние выбранных производных нитротриазола на взрывчатые характеристики нанотермита CuO/Al снижается в следующей порядке 1Ме-3Н > Э-3Н > Т-3Н.

Ключевые слова: нанотермиты, производные нитротриазола, взрывчатые свойства.

ВВЕДЕНИЕ

К нанотермитам относятся порошкообразные смеси наноразмерных частиц металла и оксида менее активного металла. При переходе компонентов смеси в наноразмерное состояние наблюдаются следующие особенности – высокая скорость горения (до 2600 м/с), способность к горению в тонком слое и микронавесках [1–4]. Благодаря представленным особенностям нанотермиты рассматриваются как перспективный материал для создания различных микроразмерных пиротехнических устройств [5–9]. Однако, в настоящее время широкое практическое использование нанотермитов затруднено, ввиду их высокой чувствительности [10–14]. Стандартным способом снижения чувствительности высокоэнергетических материалов является использование флегматизирующих добавок. Для нанотермитов в качестве флегматизаторов использовались различные материалы – графит, графен, углеродные нанотрубки, дисульфид молибдена, полианилин, фторопласт [12,13,15–19]. Введение подобных материалов способствует снижению чувствительности нанотермитов, но взрывчатые параметры нанотермитных систем ухудшаются, вплоть до потери способности горения в тонком слое и микронавесках [20]. В связи с чем актуален поиск материалов способных снизить чувствительность нанотермитных композиций, при этом сохраняя взрывчатые параметры смеси на приемлемом уровне.

В наших предыдущих работах [21,22] в качестве добавки производного нитротриазола (3-нитро-1,2,4-триазол) - 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Ме-3Н), которая позволяет улучшить взрывчатые

характеристики нанотермитных смесей и снизить чувствительности композиций. В связи с чем производные нитротриазола можно рассматривать как перспективные материалы для создания нанотермитных композиций.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные по влиянию ряда производных нитротриазола на взрывчатые характеристики нанотермита CuO/Al .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве компонентов нанотермитной смеси использовались наноразмерные порошки оксида меди CuO («Плазмотерм», Россия) с размером частиц 30-110 нм и алюминия (Al) марки «ALEX» («Передовые порошковые технологии», Россия) с размером частиц 50-100 нм, соотношение $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ – 85/15 %.

В качестве добавок использовались взрывчатые материалы - 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (1Ме-3Н), 1,2-бис(2-(3-нитро-1Н-1,2,4-триазол-1-ил)этокси)этан (Т-3Н), бис[2-(3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил)этил]овый эфир (Э-3Н). Основные характеристики материалов представлены в таблице 1.

Табл. 1. Характеристики производных нитротриазола

Добавка	ρ , г/см ³	$T_{пл}$, °С	$T_{разл}$, °С	ΔH , ¹ кДж/кг
1Ме-3Н $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$	1,503	65-70	240-250	1422,6
Т-3Н $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_8\text{O}_6$	1,525	94-98	350-360	329,2
Э-3Н $\text{C}_8\text{H}_{10}\text{N}_8\text{O}_5$	1,515	110-114	350-360	959,6

Изготовление нанотермитных композиций производилось 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.

Ультразвуковая обработка суспензии осуществлялась в течении 30 минут с помощью ультразвуковой ванны – ПСБ-1335-05 («ПСБ-Галс», Россия).

Компонентный состав смесей, исследуемых в настоящей работе приведен в таблице 2.

Табл.2. Компонентный состав композиций

Состав	Соотношение, масс. %
CuO/Al	76/24
CuO/Al/1Ме-3Н	71/24/5
	63/27/10
	55/30/15
	47/33/20
CuO/Al/Э-3Н	71/24/5
	63/27/10
	55/30/15
	47/33/20
CuO/Al/Т-3Н	71/24/5
	63/27/10
	55/30/15
	47/33/20

Относительная сила взрыва F (%) определялась измерением амплитуды сигнала, зафиксированного осциллографом при инициировании навески образца массой 10-50 мг на площадке тензометрического датчика Т24АМ («Тензо-М», Россия). Воспламенение образца производилось от искрового источника, представляющего собой два скрученных медных провода диаметров 0,2 мм, сближенные концы которых касались поверхности исследуемой нанотермитной композиции. 100 % величины F соответствует соотношению 76/24 % для нанотермитной смеси CuO/Al.

Схема испытаний по определению скорости горения приведена в работе [20]. Скорость горения определялась ионизационным способом в зарядах двух типов:

- Заряд в полиэтиленовой трубке внутренним диаметром 2 мм, толщиной стенки 2 мм, длиной 60 мм. Расстояние между ионизационными датчиками около 30 мм, первый датчик располагался на расстоянии около 10 мм от точки инициирования;
- 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

разлёт продуктов горения; ионизационные датчики располагались на торцах заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 и таблице 3 представлены результаты экспериментальных исследований взрывчатых параметров нанотермитной смеси CuO/Al в зависимости от содержания вводимых добавок.

Введение производных нитротриазола способствует повышению силы взрыва нанотермитной композиции, при этом зависимость силы взрыва от содержания добавки имеет экстремальный характер. Максимальные значения силы взрыва исследуемых нанотермитных композиций наблюдаются при следующем содержании добавок:

- 1Ме-3Н – 15 %, F ≈ 185 %;
- Э-3Н – 10 %, F ≈ 180 %;
- Т-3Н – 10 %, F ≈ 170 %.

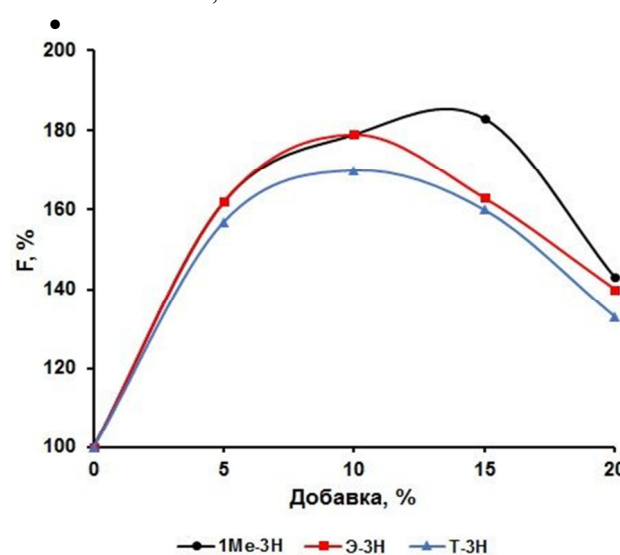


Рис. 1. Влияние производных нитротриазола на силу взрыва нанотермита CuO/Al.

В таблице 3 приведены данные скорости горения исследуемых композиций.

Табл.3. Скорость горения нанотермитной композиций CuO/Al/производное нитротриазола

Добавка и ее содержание, %	Ku ¹	u, м/с		
		в трубке диаметром 2 мм	в слое толщиной 0,1 мм	
CuO/Al	0,16	500-600	30-70	
1Ме-3Н	15	0,25	750-850	300-350
Э-3Н	10	0,20	650-750	200-300
Т-3Н	10	0,20	600-700	150-250

Примечание:
1- коэффициент уплотнения (отношение фактической плотности к ее теоретическому значению: $K_u = \rho_{факт.}/\rho_{теор.}$)

Введение производных нитротриазола позволяет увеличить скорость горения нанотермитной композиции, как в трубке, так и тонком слое,

относительно базовой смеси CuO/Al. Максимальная скорость горения исследуемых композиции наблюдается при введении 1Ме-3Н, добавка Э-3Н увеличивает скорость горения в меньшей степени, а введение Т-3Н оказывает наименьшее влияние на скорость горения среди исследуемых материалов.

Как и предполагалось из наших предыдущих работ [21,22], использование производных нитротриазола способствует увеличению взрывчатых параметров нанотермита CuO/Al. Для всех исследуемых нанотермитных композиций наблюдается экстремальный характер зависимости силы взрыва от содержания добавки. Однако, отдельно стоит отметить следующие результаты исследований:

1. Предельные значения F для 1Ме-3Н наблюдаются при содержании добавки 15 %, тогда как для Э-3Н и Т-3Н при содержании 10 %;

2. Эффект увеличения взрывчатых свойств нанотермитной системы от введения добавок снижается в ряду 1Ме-3Н>Э-3Н>Т-3Н.

Данные наблюдения вероятнее всего связаны с полной разложением вводимых добавок в процессе горения нанотермитной системы, которая непосредственно зависит от термических характеристик вводимой добавки. Так для 1Ме-3Н температура разложения составляет ~ 250 °С, тогда как для Э-3Н и Т-3Н она заметно выше ~360 °С. Таким образом можно сказать, что 1Ме-3Н обладает максимальной степенью разложения в процессе горения нанотермитных систем, среди рассмотренных в работе производных нитротриазола. Однако, это не в полной мере объясняет причину снижения влияния производных нитротриазола в ряду 1Ме-3Н>Э-3Н>Т-3Н на взрывчатые свойства нанотермита CuO/Al в ряду.

Материалы Э-3Н и Т-3Н обладают равной температурой разложения, в связи с чем можно было ожидать одинаковый прирост взрывчатых параметров для нанотермитной композиции. Но при введении Т-3Н взрывчатые параметры композиции становятся хуже, чем при введении Э-3Н и, тем более 1Ме-3Н. Подобный характер влияния добавки может быть связан с энергетическими свойствами используемых материалов. Расчетная теплота взрывчатого превращения (Q) [23] исследуемых производных нитротриазола составляет для 1Ме-3Н – 5200 кДж/кг, для Э-3Н – 5000 кДж/кг, а для Т-3Н – 4570 кДж/кг. Таким образом, снижение влияния исследуемых материалов на взрывчатые характеристики нанотермитной смеси, обусловлено уменьшением выделяемого тепла от добавки при её разложении в процессе горения нанотермитной смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение производных нитротриазола способствует увеличению скорости горения нанотермитной композиции в тонком слое и трубке.

Для исследуемых композиций зависимость силы взрыва от содержания добавки имеет экстремальный характер, где максимальные значения F наблюдаются при содержании 1Ме-3Н – 15 %, Э-3Н и Т-3Н – 10%. Влияние производных нитротриазола на взрывчатые параметры нанотермита CuO/Al снижается в следующем ряду 1Ме-3Н>Э-3Н>Т-3Н.

Установленные зависимости взрывчатых параметров от содержания производных нитротриазолов, могут быть объяснены различной полнотой разложения и тепловыделения используемых добавок.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН № 0385-2019-0011 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Stamatis D. et al. "Aluminum Burn Rate Modifiers Based on Reactive Nanocomposite Powders," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 35, № 3, pp. 260–267, 2010.
2. Son S.F. et al. "Combustion of Nanoscale Al/MoO₃ Thermite in Microchannels," *J. Propuls. Power.*, Vol. 23, № 4, pp. 715–721, 2007.
3. Thiruvengadathan R. et al. "Combustion characteristics of novel hybrid nanoenergetic formulations," *Combust. Flame.*, Vol. 158, № 5, pp. 964–978, 2011.
4. Sullivan K.T., J.D. Kuntz and A.E. Gash "Electrophoretic deposition and mechanistic studies of nano-Al/CuO thermites," *J. Appl. Phys.*, Vol. 112, № 2, pp. 024316, 2012.
5. Zhou X. et al. "Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator," *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 9, 2011.
6. 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.
7. 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.
8. Staley C.S. et al. "Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters," *J. Propuls. Power.*, Vol. 29, № 6, pp. 1400–1409, 2013.
9. Apperson S.J. et al. "Characterization of Nanothermite Material for Solid-Fuel Microthruster Applications," *J. Propuls. Power.*, Vol. 25, № 5, pp. 1086–1091, 2009.
10. 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.
11. Siegart B. et al. "Reduced-sensitivity nanothermites containing manganese oxide filled carbon nanofibers," *J. Phys. Chem. C.*, Vol. 114, № 46, pp. 19562–19568, 2010.
12. 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.
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. 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.
15. Foley T. et al. "Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 32, № 6, pp. 431–434, 2007.
16. 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.

17. Steelman R. et al. "Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition," *J. Electrostat.*, Vol. 76, pp. 102–107, 2015.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. Исследование свойств нанотермита Вi₂O₃/Al и композиций на его основе / Гордеев В.В. [и др.] // Южно-сибирский научный вестник. - 2018. - № 4. - С. 261–268.

22. 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.

23. Белов Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы [Текст] / Г.В. Белов. - Научный ми. М., 2002. - 184 с.

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 3-NITRO-1,2,4-TRIAZOLE DERIVATIVES ON COMBUSTION PERFORMANCE OF CUO/AL NANOTHERMITES

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

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

The paper considers the combustion performance of CuO/Al/additive, where high energy materials of nitrotriazole derivatives-1Me-3H, T-3H, and E-3H are used as additives. The additives allowed the improvement in explosion force (F) to 185 %, and the combustion rate in the tube (b = 2 mm) to 850 m/s, in a thin layer (0.1 mm) up to 350 m/s. All the studied compositions are characterized by an extreme dependence of the explosion force on the content of the additive, while the limit values of F are observed at the content of 1Me-3H-15 %, T – 3H and E-3H – 10 %. It was found that the influence of the selected nitrotriazole derivatives on the explosive characteristics of CuO/Al nanothermite decreases in the following order 1Me-3H>E-3H>T-3H.

Keyword: nanothermites, combustion performance, nitrotriazole derivatives.

REFERENCES

1. Stamatis D. et al. "Aluminum Burn Rate Modifiers Based on Reactive Nanocomposite Powders," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 35, № 3, pp. 260–267, 2010.
2. Son S.F. et al. "Combustion of Nanoscale Al/MoO₃ Thermit in Microchannels," *J. Propuls. Power.*, Vol. 23, № 4, pp. 715–721, 2007.
3. Thiruvengadathan R. et al. "Combustion characteristics of novel hybrid nanoenergetic formulations," *Combust. Flame.*, Vol. 158, № 5, pp. 964–978, 2011.
4. Sullivan K.T., J.D. Kuntz and A.E. Gash "Electrophoretic deposition and mechanistic studies of nano-Al/CuO thermites," *J. Appl. Phys.*, Vol. 112, № 2, pp. 024316, 2012.
5. Zhou X. et al. "Influence of Al/CuO reactive multilayer films additives on exploding foil initiator," *J. Appl. Phys.*, Vol. 110, № 9, 2011.
6. 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.
7. 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.
8. Staley C.S. et al. "Fast-Impulse Nanothermite Solid-Propellant Miniaturized Thrusters," *J. Propuls. Power.*, Vol. 29, № 6, pp. 1400–1409, 2013.
9. Apperson S.J. et al. "Characterization of Nanothermite Material for Solid-Fuel Microthruster Applications," *J. Propuls. Power.*, Vol. 25, № 5, pp. 1086–1091, 2009.
10. Piercey D.G. and T.M. Klapötke "Nanoscale Aluminum - Metal Oxide (Thermit) Reactions for Application in Energetic Materials," *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 7, № 2, pp. 115–129, 2010.
11. Siegert B. et al. "Reduced-sensitivity nanothermites containing manganese oxide filled carbon nanofibers," *J. Phys. Chem. C.*, Vol. 114, № 46, pp. 19562–19568, 2010.
12. 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.
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. 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.
15. Foley T. et al. "Development of nanothermite composites with variable electrostatic discharge ignition thresholds," *Propellants, Explos. Pyrotech.*, Vol. 32, № 6, pp. 431–434, 2007.
16. 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.
17. Steelman R. et al. "Desensitizing nano powders to electrostatic discharge ignition," *J. Electrostat.*, Vol. 76, pp. 102–107, 2015.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. A study of properties of Bi₂O₃/Al nanothermite and its composites / Gordeev V.V. et al. // *South-Siberian Scientific Bulletin*. - 2018. - № 4. - pp. 261–268.
22. 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). - pp. 339–345.
23. Belov G V 2002 *Termodinamicheskoye modelirovaniye: metody, algoritmy, programmy* [Thermodynamics modeling: methods, algorithms, programs] (Moscow: Nauchnyi Mir) p. 184

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.