

ТЕРМИЧЕСКИЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БИЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ НИТРОТРИАЗОЛА

М.В. Комарова, Н.В. Козырев, А.Г. Вакутин, А.Г. Суханова

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

В статье приводятся расчёты детонационных характеристик бициклических производных 3-нитро-1,2,4-триазола и взрывчатых композиций на их основе. Описаны термические свойства бициклических производных и эвтектических сплавов с тротилом, полученные методами термического анализа; указаны температуры плавления эвтектик.

Результаты исследования показали, что скорость детонации композитов на основе бициклических производных сопоставима, либо может превышать аналогичный показатель для композиций на основе тротила. Составы, содержащие эвтектические сплавы имеют приемлемые технологические и детонационные свойства. Наиболее перспективными являются Бис[2-(3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил)этил]овый эфир и 1,2-Бис(2-(3-нитро-1Н-1,2,4-триазол-1-ил)этокси)этан.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, тротил, 3-нитро-1,2,4-триазол, эвтектика.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении нескольких последних десятилетий проводятся активные разработки всё более мощных энергетических веществ и композиционных взрывчатых систем [1]. Конструирование новых высокоэнергетических материалов (ВЭМ) требуется для добычи природных ресурсов, строительных работ и военных целей. Увеличение мощности взрывчатых веществ часто приводит к ухудшению безопасности при их производстве, хранении и использовании.

Известно, что взрывобезопасность ВЭМ зависит от характеристик её компонентов, таких как химическая совместимость, термическая стабильность и чувствительность к механическим воздействиям [2, 3]. Чувствительность ВЭМ, в том числе и литевых композиционных взрывчатых систем (ЛКВС) можно корректировать за счёт малочувствительных топливных матриц, например, заменяя тринитротолуол (ТНТ) динитроанизолом (ДНАН) [4, 5]. В настоящее время ДНАН производится и используется в США в качестве энергетической плавкой основы, понижающей класс опасности композиций за счёт низкой восприимчивости к детонации. Однако, материал имеет ряд недостатков, поэтому поиск малочувствительных веществ для замены ТНТ продолжается.

Наши исследования показали, что различные производные 3-нитро-1,2,4-триазола могут быть использованы вместо ТНТ в ЛКВС [6]. Так, например, 1-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (МеЗН) имеет хорошие показатели для технологической переработки, отличные детонационные характеристики и низкую чувствительность к механическим воздействиям (табл. 1).

Целесообразным является применение эвтектических сплавов. Так, согласно нашим данным, ЛКВС на основе октогена (НМХ): МеЗН/ТНТ/НМХ (20 масс. % /30 масс. % /50 масс. %) и ТНТ/НМХ (50 масс. % /50 масс. %) имеют приблизительно равные значения скорости детонации (7978 м/с и 7971 м/с соответственно), при этом чувствительность к механическим воздействиям первого состава меньше в 1,6 раза (к удару) и в 1,3 раза (к ударному сдвигу).

Табл. 1. Свойства высокоэнергетических плавких веществ

Свойства	Вещества		
	ТНТ	ДНАН	МеЗН
Плотность, г/см ³	1,47 ÷ 1,59	1,34 ÷ 1,48	1,48
Температура плавления, °С	80,1 ÷ 80,9	94,5 ÷ 95,6	65,7 ÷ 65,9
Скорость детонации, м/с	6700 ÷ 6770	5000 ÷ 5620	6900
Чувствительность к удару, мм	200	≥ 500	≥ 500
Чувствительность к ударному сдвигу, МПа	650	981	981

В настоящей работе приводятся исследования термических и детонационных свойств производных 3-нитро-1,2,4-триазола другого класса – олигомерных бициклических кислород-азотсодержащих нитротриазолов, их эвтектических сплавов с ТНТ, композиций с НМХ и гексанитрогексаазаизовюрцитаном (CL-20). Целью исследования является расширение композиционной базы малочувствительных энергосодержащих плавких основ для ЛКВС.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использованы ТНТ, НМХ и CL-20 промышленного производства (Россия) и бициклические производные нитротриазолов, синтезированные в лабораторных условиях: 3-нитро-

1-{2-[2'-(3'-метил-5'-нитро-1',2',4'-триазол-1'-ил)этокси]этил}-5-метил-1,2,4-триазол или сокращенно 1,2-Бис-Э-3НМ; 1,2-Бис(2-(3-нитро-1Н-1,2,4-триазол-1-ил)этокси)этан или 1,1-Бис-Т-3Н; 3-нитро-2'Н-[1,3']би[[1,2,4]-триазол] или Бис-2МеЗН-3Н; Бис[2-(3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил)этил]овый эфир или 1,1-Бис-Э-3Н.

Эвтектические сплавы готовили из порошкообразных смесей ТНТ и бициклических производных нитротриазолов, содержащих различные весовые соотношения этих веществ (30/70, 50/50 и 70/30). Смеси нагревали до перехода в жидкое состояние, затем охлаждали при комнатной температуре до полного затвердевания и измельчали. Хранили в герметичных стеклянных бюксах. ЛКВС изготавливали расплавлением 50 масс. % плавкого энергетического вещества вместе с 50 масс. % НМХ либо CL-20.

Термические свойства веществ и композиций исследовались методом дифференциальной сканирующей калориметрии (метод DSC), термогравиметрическим и дифференциального термического анализа (метод TGA/SDTA) на термоанализаторах «HPDSC1» и «TGA/SDTA851^е» (оборудование «Mettler Toledo», Швейцария) в температурном диапазоне от 25 °С до 125 °С и 500 °С, со скоростью нагрева образцов 10 °С/мин. в динамичной атмосфере азота (60 мл/мин.). Вес испытуемых образцов составлял 1,5 мг ÷ 2,5 мг. Использовались стандартные алюминиевые тигли без крышек либо с перфорированными крышками. Для обработки результатов экспериментов и оцифровки графической информации использовалась версия 14.00 программного обеспечения «STAR^е Software» термоанализатора.

Расчётные данные детонационных характеристик взрывчатых систем получены с использованием уравнения состояния ВКВ-NV [7] в предположении образования графита в продуктах взрыва, уравнение состояния которого описано в работе [8]. Энтальпии образования бициклических производных нитротриазола, необходимые для расчетов, были получены методом [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены результаты измерения термических характеристик бициклических производных нитротриазола методом DSC:

- T_D , T_M и T_C – температуры начала плавления вещества, экстремальное значение температуры (эндотермического эффекта) и конечная температура процесса плавления;

- T_S , T_D и T_F – температуры начала разложения вещества, экстремальное значение температуры (экзотермического эффекта) и конечная температура процесса разложения;

- Q_M и Q_D нормализованные величины тепловых эффектов, зафиксированные термоанализатором. Знак «-» означает поглощение тепла, «+» соответствует его выделению.

Согласно полученным данным, три из четырёх веществ имеют по одному пику плавления и разложения. В случае Бис-МеЗН-3Н термоанализатор фиксирует плавление и испарение. Бис-МеЗН-3Н, являясь наиболее тугоплавким (табл. 2), после перехода в жидкое состояние быстро переходит в газообразное. Наибольшее количество тепла выделяется при разложении 1,1-Бис-Э-3Н. Кроме того, все исследуемые бициклические производные нитротриазола обладают более высокими температурами плавления, чем ТНТ (табл. 1).

Табл. 2. Термические характеристики исходных материалов

Свойства	Олигомерные производные нитротриазола			
	1,1-Бис-Т-3Н	1,1-Бис-Э-3Н	1,2-Бис-Э-3НМ	Бис-2МеЗН-3Н
T_B , °С	93,4	104,2	105,3	111,2
T_M , °С	94,4	106,4	109,9	113,4
T_C , °С	95,9	112,6	115,1	114,9
Q_M , Дж/г	-177,5	-84,5	-75,8	-113,4
T_S , °С	320,9	246,5	329,6	213,1
T_D , °С	355,4	359,4	361,3	264,7
T_F , °С	366,8	391,8	376,9	269,3
Q_D , Дж/г	+1091,7	+1278,7	+993,6	-391,1

В табл. 3 приведены результаты измерений образцов ЛКВС.

Табл. 3. Термические свойства ЛКВС

Вещества	Свойства			
	T_M , °С	T_S , °С	T_D , °С	Q_D , Дж/г
НМХ 50 %				
1,1-Бис-Т-3Н	93,3	235,5 283,2	258,9 339,1	+1745,2 +148,3
1,1-Бис-Э-3Н	105,4	240,1 321,8	262,3 348,7	+2009,8 +100,5
1,2-Бис-Э-3НМ	110,9	244,6 324,6	264,7 358,1	+1590,2 +127,7
Бис-2МеЗН-3Н	112,9	278,5	281,4	+634,5
CL-20 50%				
1,1-Бис-Т-3Н	94,8	200,2 297,1	212,4 346,4	+2372,9 +319,2
1,1-Бис-Э-3Н	105,8	206,2 320,9	218,4 361,8	+2559,9 +396,9
1,2-Бис-Э-3НМ	110,5	205,2 334,5	218,1 360,5	+1912,3 +228,9
Бис-2МеЗН-3Н	113,2	201,3 247,6	218,8 262,5	+1649,5 +125,7

На рис.1 и рис. 2 показаны термограммы (кривые DSC и TGA/SDTA) плавкого энергетического вещества 1,1-Бис-Т-3Н и его композиций: 1,1-Бис-Т-3Н/НМХ 50/50; 1,1-Бис-Т-3Н/CL-20 50/50.

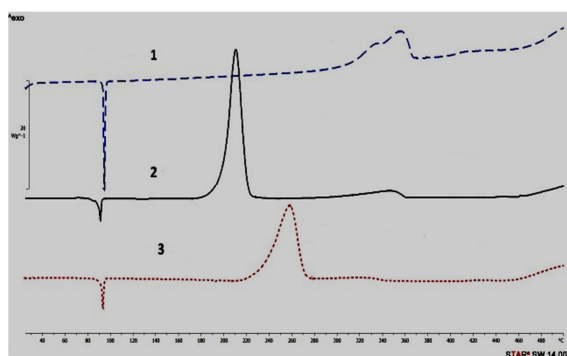


Рис. 1. Кривые DSC: 1 – 1,1-Бис-Т-3Н; 2 – 1,1-Бис-Т-3Н/CL-20; 3 – 1,1-Бис-Т-3Н/HMX

Анализ форм графических изображений сводился к определению качественных различий кривых DSC исходных компонентов и ЛКВС. Для всех исследуемых бициклических производных нитротриазола получены аналогичные результаты (кроме Бис-2МеЗН-3Н/HMX): исходным компонентам соответствует один пик разложения, композициям с CL-20 и HMX – два. Следовательно, ЛКВС разлагаются в два этапа, которые на кривых TGA выражены двумя последовательными ступенями (рис. 2).

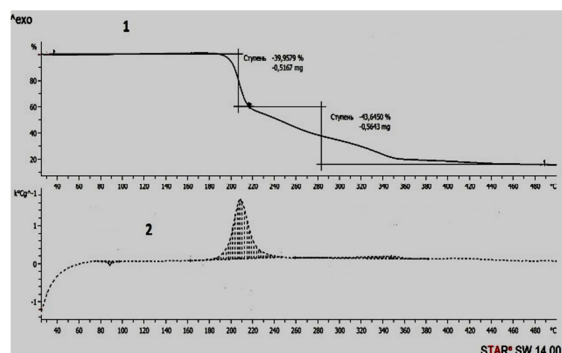


Рис. 2. Термограмма 1,1-Бис-Т-3Н/CL-20: 1 – TGA; 2 – SDTA

Согласно данным табл. 3, значения температур плавления фактически соответствуют температурам плавления бициклических производных (табл. 2). Экстремумы процессов разложения сместились в область более низких температур на 16 °С ÷ 20 °С (HMX, $T_D \approx 281$ °С) и 37 °С ÷ 43 °С (CL-20, $T_D \approx 255$ °С). Количество тепла увеличилось на 360 Дж/г ÷ 690 Дж/г для составов с HMX ($Q_D = 1743,3$ Дж/г) и на 390 Дж/г ÷ 1060 Дж/г для составов с CL-20 ($Q_D = 2505,9$ Дж/г). Исключение составила композиция Бис-2МеЗН-3Н/HMX 50/50. Выделение наименьшего количества тепла в системах с HMX и CL-20 (табл. 3) говорит о частичном наложении во времени процессов испарения Бис-2МеЗН-3Н и разложения наполнителя. Наибольшее количество тепла было зафиксировано при испытаниях образцов на основе 1,1-Бис-Э-3Н. Следует так же отметить, что величина смещения экзотермического эффекта на кривой DSC

более 30 °С (составы с CL-20) говорит о возможном химическом взаимодействии компонентов.

Как уже было отмечено выше, бициклические производные нитротриазолов плавятся при температуре более 90 °С. Необходимо снизить этот показатель для улучшения технологических свойств плавкого вещества. С этой целью можно использовать эвтектические сплавы с ТНТ. В работах [6, 10] нами подробно описано термическое поведение доэвтектических, эвтектических и заэвтектических составов с производными нитротриазола. Показано, что в зависимости от содержания компонентов на кривых DSC вместо одного пика плавления могут присутствовать два (T_{E1} и T_{E2}), первый из которых соответствует эвтектической температуре.

В табл. 4 приведены температурные значения для сплавов бициклических производных нитротриазола с ТНТ.

Табл. 4. Температурные значения параметров T_{E1} и T_{E2}

Т, °С	Вещества			
	1,1-Бис-Т-3Н	1,1-Бис-Э-3Н	1,2-Бис-Э-3НМ	Бис-2МеЗН-3Н
ТНТ 30 %				
T_{E1}	70,1	69,9	72,1	61,9
T_{E2}	81,8	88,6	90,1	95,1
ТНТ 50 %				
T_{E1}	69,9	69,8	71,9	61,8
T_{E2}	73,5	78,8	77,3	79,9
ТНТ 70 %				
T_{E2}	69,7	69,9	72,2	61,6
T_{E2}	–	–	–	–

Согласно, полученным результатам для трёх из четырех сплавов эвтектическая температура находится в диапазоне 69,7 °С ÷ 72,2 °С. Данный показатель можно уже считать приемлемым. Эвтектика Бис-2МеЗН-3Н и ТНТ имеет более низкую температуру плавления (табл. 4), которая также допустима для ЛКВС в зависимости от условий хранения и эксплуатации. Таким образом, для ЛКВС пригодны любые сплавы 1,1-Бис-Т-3Н/ТНТ; к плавким энергетическим веществам 1,1-Бис-Э-3Н, 1,2-Бис-Э-3НМ и Бис-2МеЗН-3Н необходимо добавлять не менее 50 масс. % ТНТ.

В табл. 5 приведены результаты численного эксперимента. Перечислены значимые характеристики бициклических производных нитротриазола и взрывчатых систем с HMX: плотность (ρ), скорость детонации (V_D) и давление (P). Расчеты проводились с учетом энтальпий ($\Delta H_f^{298,15}$) 1,1-Бис-Т-3Н (112,7 кДж/моль), 1,1-Бис-Э-3Н (286,2 кДж/моль), 1,2-Бис-Э-3НМ (504,9 кДж/моль) и Бис-2МеЗН-3Н (491,1 кДж/моль).

Табл. 5. Детонационные свойства ВЭМ и взрывчатых систем

Состав	ρ , г/см ³	V_D , м/с	P , кбар
ТНТ	1,654	6773	188
НМХ	1,910	9083	397
1,1-Бис-Т-3Н	1,525	6800	167
1,1-Бис-Э-3Н	1,515	6908	176
1,2-Бис-Э-3НМ	1,467	6508	145
Бис-2Ме3Н-3Н	1,530	7069	183
НМХ 50%			
ТНТ	1,773	7971	284
1,1-Бис-Т-3Н	1,696	7849	261
1,1-Бис-Э-3Н	1,690	7894	265
1,2-Бис-Э-3НМ	1,657	7710	244
Бис-2Ме3Н-3Н	1,699	8014	272
1,1-Бис-Т-3Н/ТНТ 20/30	1,741	7914	275
1,1-Бис-Э-3Н/ТНТ 20/30	1,739	7938	277
1,2-Бис-Э-3НМ/ТНТ 20/30	1,725	7863	269
Бис-2Ме3Н-3Н 20/30	1,743	7992	280

Расчеты показывают, что V_D плавких энетических веществ 1,1-Бис-Т-3Н, 1,1-Бис-Э-3Н выше, чем скорость детонации ТНТ. Аналогичные показатели для ЛКВС несколько ниже, чем у ТНТ/НМХ 50/50, а для систем на основе эвтектических сплавов 1,1-Бис-Т-3Н/ТНТ, 1,1-Бис-Э-3Н/ТНТ практически равны. Расчетные V_D плавкого вещества Бис-2Ме3Н-3Н и ЛКВС его содержащее имеют наибольшие численные величины (табл. 5), однако учитывая результаты термического анализа можно предположить, что указанные значения сложно достигнуть в реальных условиях. Таким образом, именно 1,1-Бис-Т-3Н и 1,1-Бис-Э-3Н предпочтительны для частичной замены ТНТ в ЛКВС с НМХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальными и численными методами исследованы термические и детонационные свойства бициклических производных 3-нитро-1,2,4-триазола с целью применения в качестве плавкой энергетической матрицы ЛКВС.

Показано, что эвтектические сплавы Бис[2-(3-нитро-1,2,4-триазол-1-ил)этил]овый эфира и 1,2-Бис(2-(3-нитро-1Н-1,2,4-триазол-1-ил)этокси)этана с ТНТ можно использовать для конструирования высокоэнергетических взрывчатых систем.

Исследование выполнено по проекту в рамках Государственной программы с регистрационным номером темы АААА-А17-117012310146-1 при использовании приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Талавар, М.Б. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов / М.Б. Талавар,

Р. Сиваблан, М. Аннияппан, Г.М. Горе, С. Астана и др. // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – № 1. – С. 72 – 85.

2. Wang, Q.-H. “A New Melt-cast Explosive Formulation”, *Energetic Materials*, vol. 12, no. 1, pp. 46–49, 2004.

3. Badgujar, D., Talawar, M. “Thermal Analysis and Sensitivity Studies on Guanlyurea Dinitramide (GUDN or FOX-12). Based Melt Cast Explosive Formulations”, *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 14, no. 2, pp. 269–303, 2017.

4. Mishra, V. S., Vadali, S. R., Bhagat, A. L., Garg, R. K., Kugaonkar, et al. “Stadies on NTO-, FOX-7- and DNAN-based Melt Cast Formulations”, *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 14, no. 2, pp. 403–417, 2017.

5. Miao, F., Zhang, X., Zhou, L., Wu, X., Jiang, T., Xing, R. “Hugoniot and Mie-Grüneisen equation of state of unreacted 2,4-dinitroanisole (DNAN)”, *Int. J. Impact Eng.*, 34: 103369, 2019.

6. Komarova, M., Wakutin, A., Kozыrev, N., Sukhanov, G., Il'yasov, S., “New fusible binder additives for composite explosives”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 243, P00016, pp. 1–7, 2018.

7. Kozыrev, N.V. “Reparametrization of the BKW Equation of State for CHNO Explosives which Release no Condensed Carbon upon Detonation”, *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 12, no. 4, pp. 651–669, 2015.

8. Cowan, R. D., Fickett, W. “Calculation of detonation properties of solid explosives with Kistiakowsky-Wilson equation of state”, *J. Chem. Phys.*, vol. 24, no. 5, pp. 932–939, 1956.

9. Joback, K. G., Reid, R.C. “Estimation of pure-component properties from group-contributions”, *Chem. Eng. Commun.*, vol. 57, no. 1–6, pp. 233–243, 1987.

10. Комарова, М.В. Исследование свойств высокоэнергетических эвтектик на основе производных нитротриазола / М.В. Комарова, А.Г. Вакутин, М.В. Казутин, Н.В. Козырев // Южно-сибирский научный вестник. – 2019. – № 2. – С. 92 – 96.

Комарова Марина Витальевна – к.ф.-м.н., н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854)301866, e-mail: mv10mv@mail.ru.

Козырев Николай Владимирович – д.т.н., г.н.с., зав. лабораторией физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел.: (3854)305805, e-mail: kozыrev@ipcet.ru

Вакутин Алексей Геннадьевич – к.т.н., н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854)301671, e-mail: alex-wakutin@mail.ru.

Суханова Анна Геннадьевна – к.х.н., с.н.с., зав. лабораторией химии и технологии высокоэнергетических азолов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854)301845, e-mail: iphel@mail.ru.

THERMAL AND DETONATION PROPERTIES OF BICYCLIC NITROTRIAZOLE DERIVATIVES

M.V.Komarova, N.V. Kozyrev, A.G.Vakutin, A.G. Sukhanova

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk

The article presents calculations of detonation characteristics of bicyclic derivatives of 3-nitro-1,2,4-triazole and explosive compositions based on them. The thermal properties of bicyclic derivatives and eutectic melt-casts with TNT obtained by thermal analysis are described; the melting temperatures of eutectic materials are determined.

The results of the study showed that the detonation velocity of composites based on bicyclic derivatives the detonation velocity is equal to or higher than for similar compositions with trotyl. Compositions containing eutectic melt-casts have agreeable technological and detonation properties. The most promising are Bis[2-(3-nitro-1,2,4-triazol-1-yl)ethyl]ether and 1,2-Bis(2-(3-nitro-1H-1,2,4-triazol-1-yl)ethoxy)ethane.

Keywords: explosive substances, trotyl, 3-nitro-1,2,4-triazole, eutectic.

REFERENCES

1. Talawar, M. B.; Sivablan, R.; Anniyappan, M.; Gore, G. M.; Astana, et al. "Emerging trends in advanced high energy materials", *Combust. Explos. Shock Waves*, vol. 43, no. 1, pp. 62–72, 2007.
2. Wang, Q.-H. "A New Melt-cast Explosive Formulation", *Energetic Materials*, vol. 12, no. 1, pp. 46–49, 2004.
3. Badgajar, D., Talawar, M. "Thermal Analysis and Sensitivity Studies on Guanylurea Dinitramide (GUDN or FOX-12). Based Melt Cast Explosive Formulations", *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 14, no. 2, pp. 269–303, 2017.
4. Mishra, V. S., Vadali, S. R., Bhagat, A. L., Garg, R. K., Kugaonkar, et al. "Studies on NTO-, FOX-7- and DNAN-based Melt Cast Formulations". *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 14, no. 2, pp. 403–417, 2017.
5. Miao, F., Zhang, X., Zhou, L., Wu, X., Jiang, T., Xing, R. "Hugoniot and Mie-Grüneisen equation of state of unreacted 2,4-dinitroanisole (DNAN)", *Int. J. Impact Eng.*, 34: 103369, 2019.
6. Komarova, M., Wakutin, A., Kozyrev, N., Sukhanov, G., Il'yasov, S., "New fusible binder additives for composite explosives", *MATEC Web of Conferences*, vol. 243, P00016, pp. 1–7, 2018.
7. Kozyrev, N.V. "Reparametrization of the BKW Equation of State for CHNO Explosives which Release no Condensed Carbon upon Detonation", *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, vol. 12, no. 4, pp. 651–669, 2015.
8. Cowan, R. D., Fickett, W. "Calculation of detonation properties of solid explosives with Kistiakowsky-Wilson equation of state", *J. Chem. Phys.*, vol. 24, no. 5, pp. 932–939, 1956.
9. Joback, K. G., Reid, R.C. "Estimation of pure-component properties from group-contributions", *Chem. Eng. Commun.*, vol. 57, no. 1–6, pp. 233–243, 1987.
10. Komarova, M.V., Vakutin, A.G., Kazutin, M.V., Kozyrev, N.V. "Study of the Properties of High-Energy Eutectics on Base Nitrotriazole Derivatives". *South-Siberian Scientific*, no. 2, pp. 92 – 96, 2019.

Komarova Marina Vitalyevna – Candidate of Physics and Mathematics Sciences and staff scientist, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)301866, e-mail: mv10mv@mail.ru.

Kozyrev Nikolai Vladimirovich – Head of Laboratory of Physicochemical Bases of Energetic Condensed Systems, Dr. (Engin.), Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)305805, e-mail: kozyrev@ipcet.ru.

Vakutin Alexei Gennadevich – Candidate of Engineering Sciences and staff scientist, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)301671, e-mail: alex-wakutin@mail.ru.

Sukhanova Anna Gennadevna –Candidate of Chemical Sciences, Head of Laboratory of Chemistry and Technology of High-Energy Azoles Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)301845, e-mail: ipcet@mail.ru.