

БИНАРНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДНЫХ НИТРОТРИАЗОЛА И НИТРОФУРАЗАНИЛФУРОКСАНА

М.В. Комарова, А.Г. Вакутин, Н.В. Козырев, С.Г. Ильясов

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

Методами термомеханического анализа (ТМА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) изучены свойства плавких бинарных систем, включающих высокочувствительный 3,4-бис(4-нитрофуразанил)фуроксан (НФФ) и малочувствительные производные нитротриазола: 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазолом (2-Ме-3Н), третбутил-3-нитро-1,2,4-триазолом (t-Bu-3Н) и этоксиметил-3-нитро-1,2,4-триазолом (ЭОМ-3Н). Приводятся диаграммы состояния двойных систем и компонентное содержание эвтектик. Обсуждаются проблемы совместимости с кристаллическими высокоэнергетическими материалами октогеном (НМХ) и гексанитрогексаазавюрцитаном (CL-20). Рассматриваются преимущества и недостатки методов DSC и ТМА в рамках данного исследования.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, производные нитротриазола, нитрофуразанилфуроксан, эвтектика.

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к высокоэнергетическим композиционным материалам, содержащим гетероциклические соединения, такие как фуразаны и фуроксаны, связан с рядом физико-химических свойств этих веществ: положительная энтальпия образования, содержание «активного кислорода», высокая плотность кристаллов, хорошая термическая стабильность и т.д. Указанные свойства позволяют использовать эти материалы в качестве компонентов ракетных топлив, порохов, модификаторов горения и мощных взрывчатых веществ [1-3]. Так например, представитель этого типа соединений 3,4-бис(4-нитрофуразанил-3)фуроксан (НФФ, нитрофуразанилфуроксан) сравним по мощности с современными взрывчатыми веществами, такими как октоген, гексоген и гексанитрогексаазавюрцитан [2,4,5].

К недостаткам НФФ относят его высокую чувствительность, что существенно ограничивает использование этого кристаллического наполнителя из соображений безопасности [3,5-7]. Однако способность нитрофуразанилфуроксана образовывать эвтектические составы с другими плавкими компонентами высокоэнергетических материалов (ВЭМ) позволяет корректировать (снижать) этот показатель, одновременно улучшая энергетические свойства [8-10].

Учитывая выше сказанное, правомерно предположить, что для бинарной системы с НФФ, лучше выбирать менее чувствительные вещества с температурой плавления ниже температуры плавления нитрофуразанилфуроксана или малочувствительные ВЭМ. Этому критерию удовлетворяют некоторые производные полиазотистых гетероциклических соединений. Кроме того, им свойственна высокая плотность, энтальпия образования и наличие энергоёмких групп [11,12].

Важную роль при конструировании композиционных взрывчатых веществ имеет химическое взаимо-

действие компонентов при различных температурах. Очевидно, что малейшее изменение качественного (добавки) и количественного (пропорции) содержания реагентов может повлечь кардинальные изменения в высокоэнергетической системе. Поэтому необходима предварительная экспериментальная проверка взаимовлияния веществ, входящих в конкретный состав. В качестве экспресс-метода хорошо зарекомендовал себя метод дифференциальной сканирующей калориметрии (метод DSC), используемый в области аналитической химии для быстрого анализа веществ [13].

Прогнозированию совместимости НФФ с высокоэнергетическими материалами по данным термоаналитических исследований посвящена работа [14]. Экспериментально изучено поведение НФФ с тринитротолуолом (ТНТ), с 3-нитро-1,2,4-триазол-5-он (НТО), 2,4,6-триамино-1,3,5-тринитробензолом (ТАТБ) и некоторыми полимерами. Подобные исследования, касающиеся производных нитротриазола разрозненны и требуют дополнительной проработки.

В настоящей работе приведены результаты термоаналитических экспериментов двухкомпонентных сплавов эвтектического состава нитрофуразанилфуроксана с производными нитротриазола, а также композиций с НМХ и CL-20. Обсуждаются аналитические возможности DSC и ТМА методов, адаптированных для определения совместимости взрывчатых веществ.

Данное исследование направлено на расширение компонентной базы безопасных ВЭМ и является продолжением ранее опубликованных материалов [15].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах в качестве составляющих бинарных систем были выбраны следующие производные нитротриазола: 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазол (2-Ме-3Н), третбутил-3-нитро-1,2,4-триазол (t-Bu-3Н) и этоксиметил-3-нитро-1,2,4-триазол (ЭОМ-3Н). Эти

вещества имеют низкую чувствительность к удару и трению при ударном сдвиге (≥ 500 мм при $m_{\text{груза}}=10$ кг и 0 % при 980,66 Мпа). Чувствительность к удару и трению при ударном сдвиге производных нитротриазола определяли по стандартным методикам на копрах К-44-II и К-44-III.

Бинарные системы с 3,4-бис(4-нитрофуразанил-3)фуроксаном готовили механическим смешением компонентов в массовых соотношениях от 20 % до 80 %. Далее смеси подогревались до температуры плавления наиболее тугоплавкого материала (табл. 1) и выдерживались до полного перехода в жидкое состояние. Жидкость тщательно перемешивали и охлаждали естественным способом до комнатной температуры. В случае существенной задержки процесса затвердевания (более 12 часов) состав помещали в холодильник и держали при низкой температуре ($2 \text{ }^\circ\text{C} \div 4 \text{ }^\circ\text{C}$) до образования кристаллической структуры. После затвердевания, все композиции выдерживались в нормальных условиях не менее суток.

Аналогичным образом готовили композиции ЭОМ-3Н, t-Bu-3Н, 2-Ме-3Н с октогеном и гексанитрогексаазаворцитаном: смешивали в пропорциях 1:1, нагревали до температуры плавления плавкого реагента, перемешивали, охлаждали в комнатных условиях, выдерживали до затвердевания и т.д.

Для определения термических характеристик производных нитротриазола, бинарных систем и композитов с CL-20 и HMX, использовались модульные термоанализаторы DSC822^o и TMA/SDTA840, позволяющие фиксировать тепловые эффекты и температуру стеклования. Испытывались измельченные образцы массой $0,7 \text{ мг} \div 3,5 \text{ мг}$. Рабочая атмосфера измерительной ячейки – азот; скорость нагрева $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$; диапазон температур для бинарных систем $25 \text{ }^\circ\text{C} \div 125 \text{ }^\circ\text{C}$, для остальных образцов $25 \text{ }^\circ\text{C} \div 350 \text{ }^\circ\text{C}$.

В табл. 1 приведены наиболее информативные термические свойства исходных материалов и композиций, полученные в ходе экспериментов дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC). Параметр T_n – температура начала теплового эффекта, T_p – экстремальная температура (пик теплового эффекта), Q – величина термического эффекта (знак минус означает эндотермический процесс, плюс – экзотермический). Численные значения Q получены программными средствами обработки термоаналитических измерений «STAR^o Software v 11.00».

Морфологические особенности исходных веществ и конечных продуктов визуализировались методом оптической просвечивающей микроскопии (цифровой микроскоп Motic DMBA-300 Professional Series). Полученные данные обрабатывались средствами программного обеспечения цифровых изображений «Im-ages Plus 2.0»

Табл. 1. Термические свойства исходных компонентов

Материалы	Параметры		
	$T_n, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q, \text{ Дж/г}$
t-Bu-3Н	90,6	93,8	-102,5
	197,7	248,2	-668,6
2-Ме-3Н	79,3	81,2	-104,7
	140,9	185,1	-694,2
ЭОМ-3Н	55,1	56,4	-156,1
	225,4	273,2	-683,5
CL-20	163,2	167,9	-13,4
	247,8	253,3	+2505,9
HMX	195,2	198,6	-31,5
	280,6	285,3	+1743,3
НФФ	108,6	110,3	-96,6
	194,4	230,1	-407,7
t-Bu-3Н/HMX	89,2	91,9	-54,5
	278,8	284,9	+1014,4
t-Bu-3Н/CL-20	85,1	87,6	-45,7
	201,1	221,4	+1469,2
2-Ме-3Н/HMX	71,2	76,9	-4,6
	281,1	287,6	+1379,2
2-Ме-3Н/CL-20	72,3	75,1	-2,3
	248,8	253,7	+2226,3
ЭОМ-3Н/HMX	52,4	54,1	-82,2
	268,4	278,9	+1127,2
ЭОМ-3Н/CL-20	50,1	52,3	-62,7
	201,6	221,7	+1529,9

На рис. 1. приведены кривые TMA и DSC бинарной системы нитрофуразанилфуроксана с этоксиметилнитротриазолом. Расплав включал 80 масс.% НФФ и 20 масс.% ЭОМ-3Н (80НФФ/20ЭОМ-3Н). Формы термоаналитических кривых остальных композиций имеют те же особенности: в температурном диапазоне от $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $125 \text{ }^\circ\text{C}$ регистрируются два эндотермических эффекта, первому из которых соответствует практически одно и то же значение экстремума (T_{p1}), положение второго (T_{p2}) меняется в зависимости от содержания компонентов (табл. 2). Исключения составляют термограммы с одним тепловым эффектом, местоположение которого совпадает с T_{p1} бинарных систем соответствующего типа.

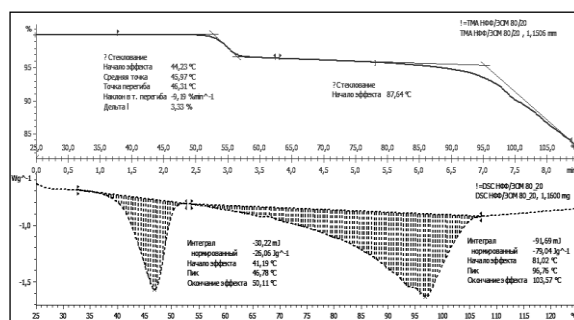


Рис. 1. Кривые TMA и DSC образца 80НФФ/20ЭОМ-3Н

Результаты, полученные термомеханическим методом (температуры стеклования и таблицы мгновенных изменений коэффициента линейного расширения) неплохо согласуются ($\pm 2,3 \text{ } \%$) в случае определения параметра T_{p1} . Для T_{p2} разброс значений довольно велик ($\pm 15,6 \text{ } \%$), что вероятно связано со спецификой измерений (измельченные образцы формируются в «сэндвичи» на специальных пластинках).

Согласно данным, полученным методом дифференциальной сканирующей калориметрии, были рассчитаны суммарные тепловые эффекты бинарных систем в температурной области до 125 °С (табл. 2).

Табл. 2. Температурные экстремумы бинарных систем

НФФ, %	20	40	50	60	80
T₁, °С					
t-Bu-3H	61,7	62,9	62,5	63,1	63,3
2-Me-3H	58,3	58,7	58,3	59,1	58,9
ЭОМ-3H	46,5	46,8	46,7	47,4	46,8
T₂, °С					
t-Bu-3H	85,5	74,4	–	73,6	94,1
2-Me-3H	72,5	63,7	–	69,6	91,8
ЭОМ-3H	52,6	–	67,2	90,6	96,9
Q, Дж/г					
t-Bu-3H	-98,3	-53,2	-50,1	-50,4	-85,8
2-Me-3H	-78,3	-63,9	-61,2	-61,8	-75,4
ЭОМ-3H	-89,1	-59,1	-69,9	-73,7	-89,3

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным табл. 1 реагенты t-Bu-3H, 2-Me-3H и ЭОМ-3H ведут себя сходным образом при тепловом воздействии. Сначала вещество плавится, чему соответствует первый эндоэффект на кривой DSC, затем происходит наложение процессов испарения и разложения (второй эндоэффект). Наименее термостойким является 2-Me-3H с температурой полного пиролиза 185,1 °С, наиболее легкоплавким – ЭОМ-3H (56,4 °С).

Добавление производных нитротриазола к октогену либо гексанитрогексаазавюрцитану влияет на термические характеристики последних. Тепловые эффекты совместного разложения t-Bu-3H и ЭОМ-3H с кристаллическими наполнителями увеличиваются, а величины эндоэффектов плавления фактически остаются прежними (рис. 2, табл. 1). Небольшой температурный сдвиг в сторону меньших значений (0,4 °С ÷ 7,4 °С) прослеживается для композиций с НМХ, для составов с CL-20 изменения параметра T₂ более существенны и могут достигать 30 °С.

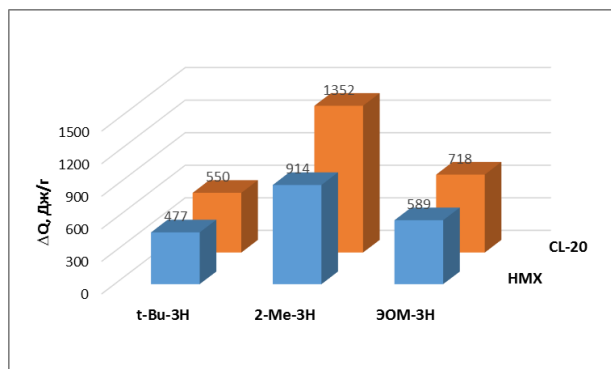


Рис. 2. Гистограмма изменений параметра Q композиций производных нитротриазола с НМХ и CL-20

Согласно гистограмме (рис.2) положительный прирост величины Q (ΔQ) имеет место для всех композиций. Особо выделяются составы с 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазолом, которые демонстрируют наи-

большее увеличение теплового эффекта разложения и резкое снижение эффекта плавления (табл. 2). Такое поведение составов 2-Me-3H/НМХ и 2-Me-3H/CL-20 свидетельствует о протекании химической реакции при ≈ 70 °С. Визуальный контроль состояния кристаллического наполнителя до и после разогрева композиций до температуры 90 °С зафиксировал морфологические изменения на поверхности НМХ и CL-20 (рис. 3 а, б).

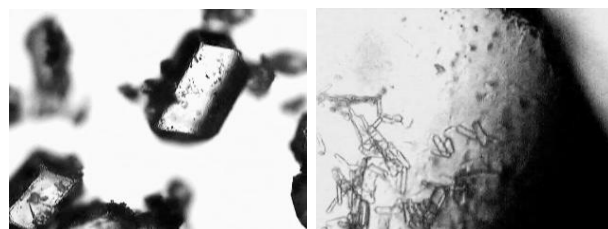


Рис. 3. Фотографии композиции 2-Me-3H/ НМХ после нагрева до 90 °С: а – НМХ (x100); б – НМХ (x1000)

Поверхность кристаллов октогена (крупная фракция) выглядит в значительной степени поврежденной («изъеденной»). Кроме того, на ней присутствуют в большом количестве мелкие кристаллы (от 7 мкм до 23 мкм) правильной формы. Для гексанитрогексаазавюрцитана изменения ещё более разрушительны: кристаллы фактически теряют первоначальную форму и «обрастают иголками». Поэтому, можно предположить с достаточно большой вероятностью, что расплавленный 2-Me-3H действительно химически взаимодействует с кристаллическими наполнителями, модифицирует их и приводит к увеличению выделения тепла при пиролизе. В случае t-Bu-3H и ЭОМ-3H с CL-20 появление дополнительного тепла связано скорее всего с синергизмом этих материалов, поскольку температурные значения начала и динамики процессов разложения достаточно близки (табл. 1).

Ниже приведены диаграммы бинарных систем НФФ/2-Me-3H и НФФ/t-Bu-3H, построенные по результатам DSC измерений (рис. 4 и рис. 5). Метод позволяет определить температуру эвтектики и приблизительное содержание компонентов. Более точные результаты можно получить, используя математические методы аппроксимации данных эндотермических эффектов (табл. 1 и табл. 2) полиномами третьей степени. В табл. 3 приведены результаты расчетов.

Табл. 3. Содержание компонентов и эвтектические температуры бинарных систем

Вещество	Содержание НФФ, %	T _e , °С
t-Bu-3H	51,2	62,3
ЭОМ-3H	41,5	46,8
2-Me-3H	52,6	58,3

Полученные эвтектические температуры значительно ниже исходных температур плавления производных нитротриазола. Для системы НФФ/ЭОМ-3H эта разница составила 9,6 °С, в НФФ/2Me-3H темпе-

ратура снизилась на 22,9 °С, для НФФ/t-Bu-3Н изменения достигли 31,5 °С.

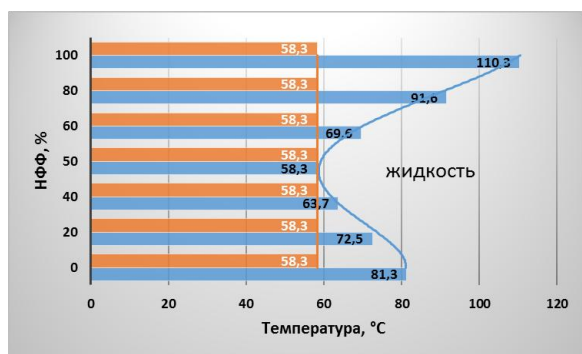


Рис. 4. Диаграмма бинарной системы НФФ/2-Ме-3Н

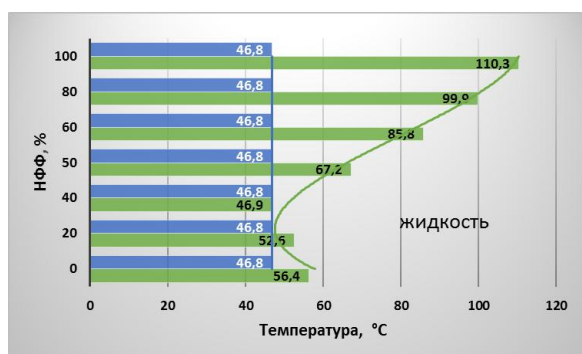


Рис. 5. Диаграмма бинарной системы НФФ/ЭОМ-3Н

Во всех трех случаях температуры плавления чистых эвтектик слишком низки для практического использования. Желательно, чтобы этот показатель располагался в диапазоне температур 80 °С ÷ 100 °С [8]. Следовательно, выбор бинарных систем с учетом данного критерия необходимо осуществлять следующим образом: в составах с t-Bu-3Н и 2-Ме-3Н должно содержаться не менее 63 % НФФ (рис. 4, табл. 2), в композиции с ЭОМ-3Н должно присутствовать более 55 % нитрофуразанилфуроксана (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии и термомеханического анализа исследованы свойства бинарных систем на основе производных нитротриазола и нитрофуразанилфуроксана.

Рассчитаны параметры состояния двухкомпонентных плавких систем НФФ/2-Ме-3Н, НФФ/ЭОМ-3Н и НФФ/t-Bu-3Н в зависимости от температуры и содержания компонентов. Вычислены показатели эвтектик.

Описаны результаты взаимодействия расплавленного 2-метил-3-нитро-1,2,4-триазола с кристаллами НМХ и CL-20.

Полученные данные позволяют расширить компонентную базу связующих добавок для композиционных взрывчатых систем.

Работа выполнена в рамках проекта № 0385-2018-0009 при использовании приборной базы Бийского регионально-

го центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мельникова, С.Ф. Производные 1,2,5-оксадиазола как энергосодержащие соединения / С.Ф. Мельникова, И.В. Целинский // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2013. – Т. 21. – С. 25–29.
2. Буржава, А.В. Исследование термического распада и горения 3,4-бис(4-нитрофуразан-3-ил)-2-оксафуразана (DNTF) / А.Б. Буржава, В.П. Синдицкий, А.Б. Шереметов // Успехи химии и химической технологии. – 2011. – Т. XXV. – № 12. – С. 72–78.
3. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Б.П. Жуков и др.; под ред. Б.П. Жукова. – 2-е изд., исправл. – М.: Янус К, 2000. – 596 с.
4. Sinditskii, V.P., A.V. Burzhava, A.B. Sheremetev and N.S. Aleksandrova, "Thermal and Combustion Properties of 3,4-Bis(3-nitrofurazan-4-yl)furoxan (DNTF)", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 37, no. 5, pp. 575–580, 2012.
5. Zheng, W. and J.-N. Wang, "Review on 3,4-Bisnitrofurazanfuroxan (DNTF)", *Chinese Journal of Energetic Materials*, vol. 14, no. 6, pp. 463–466, 2006.
6. Zhao, F.-Q., P. Chen, R.-Z. Hu, Y. Luo, Z.-Z. Zhang, Y.-S. Zhou, X.-W. Yang, Y. Gao, S.-L. Gao and Q.-Z. Shi, "Thermochemical properties and Non-isothermal Decomposition Reaction Kinetics of 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF)", *Journal of Hazardous Materials*, vol. A113, pp. 67–71, 2004.
7. Leonard, P.W., C.J. Pollard, D.E. Chavez, B.M. Rice and D.A. Parrish, "3,6-Bis(4-nitro-1,2,5-oxadiazol-3-yl)-1,4,2,5-dioxadiazene (BNDD): A Powerful Sensitive Explosive", *SYNLETT*, no. 14, pp. 2097–2099, 2011.
8. Wang, Q.-H. "A New Melt-cast Explosive Formulation", *Energetic Materials*, vol. 12, no. 1, pp. 46–49, 2004.
9. Stepanov, A. I., D. V. Dashko and A. A. Astrat'ev, "3,4-Bis(4-nitrofurazan-3-yl)furoxan: a Melt Cast Powerful Explosive and a Valuable Building Block in 1,2,5-Oxadiazole Chemistry", *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 329–342, 2012.
10. Li, H., B.-L. Wang, Q.-H. Lin and L.-P. Chen, "Compatibility Study of DNTF with Some Insensitive Energetic Materials and Inert Materials", *Journal of Energetic Materials*, vol. 34, pp. 409–415, 2016.
11. Певзнер, М.С. Производные 1,2,4-триазола – высокоэнергетические соединения / М.С. Певзнер // Российский химический журнал. – 1997. – Т. XXI. – № 2. – С. 73–83.
12. Пятаков, Д.А. Высокоэнергетические материалы на основе азотсодержащих гетероциклов / Д.А. Пятаков, В.М. Чернышев / Изд-во «НОК», 2013. – 84 с.
13. Уэндландт, У. Термические методы анализа / У. Уэндландт / М.: МИР, 1978. – 526 с.
14. Zheng, W., W. Jiangning, R. Xiaoning, L. Zhang and Y. Zhou, "An Investigation on Thermal Decomposition of DNTF-CMDB Propellants", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 32, no. 6, pp. 520–524, 2007.
15. Комарова, М.В. Термические свойства двухкомпонентных расплавов нитрофуразанилфуроксана / М.В. Комарова, А.Г. Вакутин, Н.В. Козырев, С.Г. Ильясов // Южно-сибирский научный вестник. – 2017. – № 4. – С. 135 – 139.

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.

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.

Козырев Николай Владимирович – д.т.н., заведующий 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: kozyrev@ipcet.ru

Ильсов Сергей Гаврилович – д.х.н., заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией синтеза высокоэнергетических соединений, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел. (3854)305937, e-mail: ilysov@ipcet.ru.

BINARY SYSTEMS OF NITROTRIAZOLE DERIVATIVES AND NITROFURAZANYLFUROXANE

M.V. Komarova, A.G. Vakutin, N.V. Kozyrev, S.G. Ilyasov

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

Properties of fusible binary systems composed of high-sensitivity 3,4-bis(4-nitrofurazanyl)furoxane (NFF) and insensitive nitrotriazole derivatives such as 2-methyl-3-nitro-1,2,4-triazole (2-Me-3H), tert-butyl-3-nitro-1,2,4-triazole (t-Bu-3H) and ethoxymethyl-3-nitro-1,2,4-triazole (EOM-3H) were characterized by thermomechanical analysis (TMA) and differential scanning calorimetry (DSC). Phase diagrams of binary systems and the component ratio of eutectic mixtures are reported. Compatibility problems with high-energy crystalline materials RDX and CL-20 are discussed. Merits and shortfalls of the DSC and TMA techniques in the context of this study are considered.

Index terms: explosives, nitrotriazole derivatives, nitrofurazanylfuroxane, eutectic mixture.

REFERENCES

1. Melnikova, S.F. Proizvodnyye 1,2,5-oksadiazola kak energonasyshchennyye soyedineniya [1,2,5-Oxadiazole derivative as high energy density compounds] / S.F. Melnikova, I.V. Tselinsky // *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Tekhnologicheskogo Instituta (Tekhnicheskii Universitet)* [Journal] – 2013. – V. 21. p. 25–29.
2. Burzhava, A.V. Issledovaniye termicheskogo raspada i goreniya 3,4-bis(4-nitrofurazan-3-yl)-2-oxafurazan (DNTF) [Study of thermal decomposition and combustion of 3,4-bis(4-nitrofurazan-3-yl)-2-oxafurazan (DNTF)] / A.V. Burzhava, V.P. Sinditskiy, A.B. Sheremetev // *Uspekhi Khimii i Khimicheskoy Tekhnologii* [Journal]. – 2011. – V. 25. – No. 12. – p. 25–29.
3. Energeticheskiye kondensirovannyye sistemy [Energetic condensed systems]. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar [Brief encyclopedia] / B.P. Zhukov et al.; Ed. B.P. Zhukov. – 2nd Edition, Revised. – M.: Yanus K, 2000. – 596 p.
4. Sinditskiy, V.P., A.V. Burzhava, A.B. Sheremetev and N.S. Aleksandrova, “Thermal and Combustion Properties of 3,4-Bis(3-nitrofurazan-4-yl)furoxan (DNTF)”, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol 37, no. 5, pp. 575–580, 2012.
5. Zheng, W. and J.-N. Wang, “Review on 3,4-Bisnitrofurazanfuroxan (DNTF)”, *Chinese Journal of Energetic Materials*, vol. 14, no. 6, pp. 463–466, 2006.
6. Zhao, F.-Q., P. Chen, R.-Z. Hu, Y. Luo, Z.-Z. Zhang, Y.-S. Zhou, X.-W. Yang, Y. Gao, S.-L. Gao and Q.-Z. Shi, “Thermochemical properties and Non-isothermal Decomposition Reaction Kinetics of 3,4-dinitrofurazanfuroxan (DNTF)”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. A113, pp. 67–71, 2004.
7. Leonard, P.W., C.J. Pollard, D.E. Chavez, B.M. Rice and D.A. Parrish, “3,6-Bis(4-nitro-1,2,5-oxadiazol-3-yl)-1,4,2,5-dioxadiazene (BNDD): A Powerful Sensitive Explosive”, *SYNLETT*, no. 14, pp. 2097–2099, 2011.
8. Wang, Q.-H. “A New Melt-cast Explosive Formulation”, *Energetic Materials*, vol. 12, no. 1, pp. 46–49, 2004.
9. Stepanov, A. I., D. V. Dashko and A. A. Astrat’ev, “3,4-Bis(4-nitrofurazan-3-yl)furoxan: a Melt Cast Powerful Explosive and a Valuable Building Block in 1,2,5-Oxadiazole Chemistry”, *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 329–342, 2012.
10. Li, H., B.-L. Wang, Q.-H. Lin and L.-P. Chen, “Compatibility Study of DNTF with Some Insensitive Energetic Materials and Inert Materials”, *Journal of Energetic Materials*, vol. 34, pp. 409–415, 2016.
11. Pevzner, M.S. 1,2,4-Triazole derivatives – high-energy compounds / M.S. Pevzner // *Russian Chemical Journal*. – 1997. – Vol. XLI. – No. 2. – p. 73–83.
12. Pyatakov, D.A. High-energy materials based on nitrogen heterocycles / D.A. Pyatakov, V.M. Chernyshev / NOK Publisher, 2013. – 84 p.
13. Wendlandt, W.W. Thermal Methods of Analysis, John Wiley & Sons., New York, 1974. – 499 p.
14. Zheng, W., W. Jiangning, R. Xiaoning, L. Zhang and Y. Zhou, “An Investigation on Thermal Decomposition of DNTF-CMDB Propellants”, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 32, no. 6, pp. 520–524, 2007.
15. Komarova, M.V. Thermal properties of binary melts of nitrofurazanylfuroxane / M.V. Komarova, A.G. Vakutin, N.V. Kozyrev, S.G. Ilyasov // *South-Siberian Scientific Bulletin*. – 2017. – No. 4. – p. 135 – 139.

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.

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.

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.

Ilyasov Sergey Gavrilovich – Dr. (Chem), Deputy Director for Research, Head of Laboratory of High-Energy Compounds Synthesis, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), tel.: (3854)305937, e-mail: ilyasow@ipcet.ru.