

УДК 621.454.3; 547.235; 547.411; 547.414; 547.793.2

НЕКОТОРЫЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТРИНИТРОМЕТИЛ- ОНN-АЗОКСИ-ФУРАЗАНЫ КАК ПЛАСТИФИКАТОРЫ СВЯЗУЮЩЕГО В МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВАХ

© 2024 г. В. В. Парахин¹, В. М. Волохов², Е. С. Амосова²,
И. И. Акостелов³, Д. Б. Лемперт^{2*}

¹Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук,
Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
Российской академии наук, Черноголовка, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: lempert@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023;
после доработки 02.06.2023;
принята в печать 20.06.2023

Для выявления перспективных направлений поиска высокоэнергетических материалов возникает острая необходимость дать всесторонний анализ энергетического потенциала соединений различных классов. В работе проведено исследование энергетического потенциала ряда органических соединений, содержащих в своей структуре фрагмент $-N=N(O)-C(NO_2)_3$, в качестве пластификаторов полимерного связующего в смесевых твердых топливах. Изучены девять тринитрометил-ОНN-азокси-производных фуразана и одно аналогичное соединение метана, из которых четыре — реально синтезированные вещества, остальные — пока гипотетические структуры. Проведена оценка баллистической эффективности смесевых твердых топлив трех различных видов (без металла, с алюминием и с гидридом алюминия), в которых пластификатором полимерного связующего выступает одно из изучаемых соединений с тринитрометил-ОНN-азокси-фрагментом. Расчетным путем определены значения энтальпии образования и плотности этих топлив. Сравнительный анализ баллистической эффективности их с аналогичными составами, содержащими в качестве пластификатора наиболее мощные из рассматриваемых в настоящее время энергоемких компонентов (нитроглицерин, тетранитрометан или динитрофуразан) показал, что практически все изученные представители класса тринитрометил-ОНN-дiazеноксидов по баллистической эффективности существенно превосходят большинство применяемых пластификаторов смесевых твердых топлив.

Ключевые слова: тринитрометил-ОНN-азокси-соединения, смесевое твердое топливо, СТТ, пластификатор, энтальпия образования, плотность, термодинамические расчеты, удельный импульс, эффективный импульс.

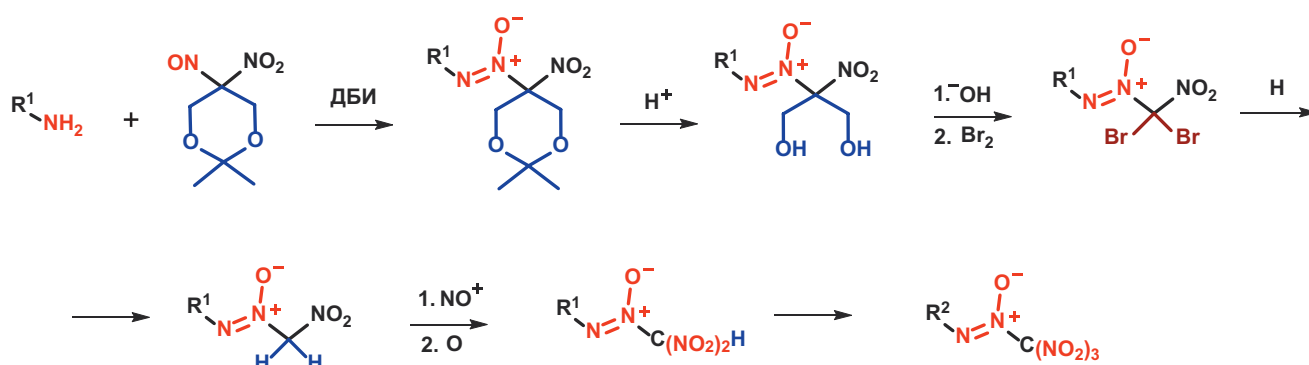
DOI: 10.31857/S0207401X24050053

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие возросло количество работ по поиску новых компонентов для различных высокоэнергетических материалов (ВЭМ) (взрывчатые вещества, пороха, пиротехнические составы, ракетные топлива и др.). Подавляющее большинство исследований посвящено поиску новых основных компонентов энергетических композиций, в частности смесевых твердых топлив (СТТ), например окислителей, массовая доля которых в рецептуре максимальна, поэтому

увеличение их энергетического потенциала в большей мере сказывается на степени повышения энергетических параметров всего состава. Но, поскольку на современном этапе развития химии энергоемких соединений происходит все большее приближение к предельно возможным значениям энергетических характеристик компонентов СТТ, причем нередко даже небольшой рост энергетических потенциалов компонентов может привести к ухудшению других эксплуатационных свойств, следует обращать внимание на возможность повышения энергетических характеристик топлива

Схема 1



и за счет других компонентов, например пластификаторов связующего, доля которых в рецептуре находится на уровне 8–20 мас. % в зависимости от типа СТТ. Еще в 70-е годы прошлого века начали изучать эффект от замены связующих на углеводородной основе так называемым активным связующим, содержащим фрагменты-окислители, в основном группы $-\text{NO}_2$, $-\text{ONO}_2$, $>\text{NNO}_2$. Это позволило создать весьма мощные композиции на основе гидрида алюминия [1] или высокоэнтальпийных органических наполнителей с коэффициентом избытка окислителя $\alpha < 1$ (для соединений молекулярной формулы $\text{C}_x\text{H}_y\text{N}_w\text{O}_z$, $\alpha = z/(2x + y/2)$, таких как, например, октоген [2]. При этом подобные составы на углеводородном связующем не обеспечивали высоких энергетических характеристик.

В недавней работе [3] проведен подробный анализ относительной баллистической эффективности топливных композиций на основе гидрида алюминия и окислителя аммониевой соли динитрамида (АДНА) в зависимости от вида пластификатора полимерного связующего. Среди десятка различных пластификаторов наилучшие баллистические характеристики показали динитрофуразан (ДНФ), тетранитрометан (ТНМ) и нитроглицерин (НГЦ).

В работах [4–15] была представлена серия соединений нового класса высокоэнергетических тринитрометил-*ONN*-диазеноксидов, в том числе жидких и низкоплавких, вследствие чего представляющих интерес в качестве пластификаторов СТТ. Общий подход к синтезу соединений этого типа представлен на схеме 1, где ДБИ – дибромциануровая кислота. Сочетание в таких структурах насыщенной активным кислородом тринитрометильной группы с диазеноксидным фрагментом, который не только увеличивает кислородный ба-

ланс, но и повышает энтальпию образования (ΔH_f°) на ~50 ккал/моль, а также возможность введения дополнительных энергоемких фрагментов, таких как замещенный гетероцикл, позволяют повысить энтальпию образования в совокупности с достаточно высоким коэффициентом избытка окислителя наряду с другими полезными характеристиками (см. схему 1).

В настоящей работе мы изучили энергетические потенциалы высокоэнергетических (тринитрометил-*ONN*-азокси)-соединений:

- тринитрометил-*ONN*-азокси-метан (1),
- 4-метил-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (2),
- 4-метокси-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (3),
- 4-амино-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (4),
- 4-циано-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (5),
- 4-азидо-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (6),
- 4-нитро-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (7),
- 4-(*N*-метил-*N*-нитрамино)-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (8),
- 4-[*N*-метил-(*N*-нитраминометил)]-*N*-нитрамино-3-(тринитрометил-*ONN*-азокси)фуразан (9),
- 3,4-бис(тринитрометил-*ONN*-азокси)-фуразан (10),

в качестве пластификаторов связующего в СТТ. Тринитрометил-*ONN*-диазеноксиды – сравнительно новый класс ВЭМ, представители которого еще не были исследованы в этом качестве. На рис. 1 представлены 10 тринитрометил-*ONN*-

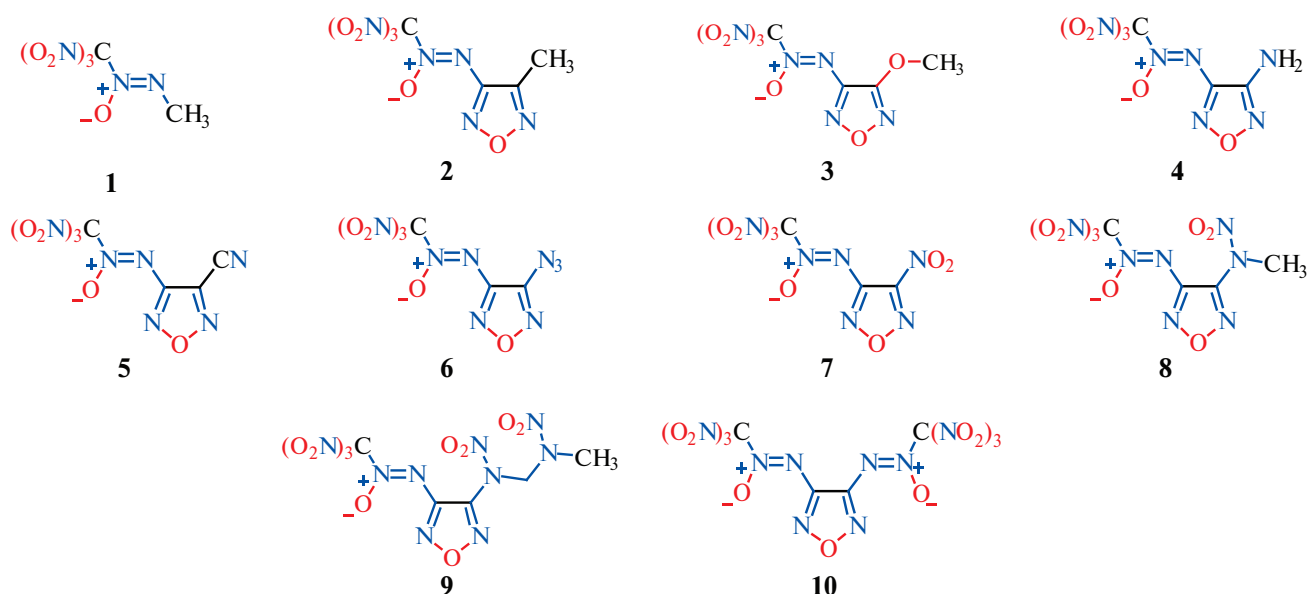


Рис. 1. Структурные формулы исследуемых тринитрометил-*ONN*-азокси-соединений.

азокси-соединений, из которых образцы **3**, **7**, **8** и **10** ранее уже были синтезированы, а остальные пока являются гипотетическими структурами, но принципиальных препятствий для возможности их синтеза нет. Причем следует отметить, что ряд уже полученных тринитрометил-*ONN*-азокси-соединений были запатентованы в качестве компонентов ракетных топлив [16].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для проведенных расчетов использовали известные составы высокоэнергетических СТТ, состоящие из активного связующего (поливинилметилтетразол (ПВМТ) с небольшим содержанием концевых карбоксильных групп: $H_{56.007}C_{37.34}O_{2.32}N_{32.69}$, $\Delta H_f^\circ = 1255$ кДж/кг, плотность $d = 1.28$ г/см³ [17]), пластифицированного рядом “активных” компонентов, жидких или низкоплавких, в массовом соотношении 1:4. Было исследовано три основных вида базовых высокоэнергетических СТТ:

а) гидрид алюминия (ГА) – 25%, активное связующее – 27 об.%, окислитель АДНА – остальное;

б) алюминий – 18%, активное связующее – 19 об.%, октоген – 50%, окислитель – перхлорат аммония (ПХА) – остальное;

с) активное связующее – 19 об.%, октоген – 50%, окислитель ПХА – остальное.

В рецептурах типов **б** с алюминием и **с** без алюминия или его гидрида массовые доли связующего и ПХА подобраны таким образом, чтобы объемное содержание связующего было равно 19%, поскольку при меньшем объемном содержании тяжело создать топливо с приемлемыми физико-механическими характеристиками, а повышение содержания связующего обычно снижает баллистические характеристики. В рецептурах типа **а** с содержанием 25% гидрида алюминия из-за его чрезвычайно высокой удельной поверхности приходится резко повышать объемную долю связующего. Так, в случае использования в качестве связующего ПВМТ, пластифицированного нитроглицерином в соотношении 1:4, она составляет ~27 об.% [1]. Поэтому все рецептуры с содержанием 25% гидрида алюминия в случае других пластификаторов также составлены из расчета ~27 об.% связующего.

Величины удельного импульса I_{sp} и температуры в камере сгорания T_c (при давлении в камере и на срезе сопла 4.0 и 0.1 МПа соответственно) были определены с помощью программы расчета высокотемпературных химических равновесий ТЕРРА [18]. Анализ эффективности исследуемых компонентов проводили по алгоритму, описанному в работах [19–23]. Для сравнения баллистической эффективности композиций, имеющих разные плотности, при их использовании в двигателях с различными объемно-массовыми характеристиками использовали так называемые вели-

Таблица 1. Расчетные характеристики исследуемых тринитрометил-*ONN*-азокси-соединений 1–10

Соединение	Формула	α^a	H^b , %	$\Delta H_{f(\text{конд})}^{\circ}$, кДж/кг	d^c , г/см ³
1	$C_2H_3N_5O_7$	1.27	1.45	606.5	1.55
2	$C_4H_3N_7O_8$	0.84	1.09	1294.8	1.61
3	$C_4H_3N_7O_9$	0.947	1.03	854.3	1.88
4	$C_3H_2N_8O_8$	1.14	0.73	1437.2	1.93
5	$C_4N_8O_8$	1.00	0.00	2012.8	1.86
6	$C_3N_{10}O_8$	1.33	0.00	2485.9	1.67
7	$C_3N_8O_{10}$	1.666	0.00	1469.9	1.75
8	$C_4H_3N_9O_{10}$	1.05	0.90	1439.8	1.82
9	$C_5H_5N_{11}O_{12}$	0.96	1.23	1322.0	1.80
10	$C_4N_{12}O_{15}$	1.875	0.00	1547.6	1.99

^a Коэффициент обеспечения молекулы кислородом; для соединений молекулярной формулы $C_xH_yN_wO_z$, $\alpha = z/(2x + y/2)$.

^b Массовая доля водорода.

^c Энтальпия образования в твердой фазе.

^d Плотность.

чины эффективных импульсов $I_{ef}(n)$ на разных ступенях ракетных систем (РС) (n – номер ступени) [24]:

$$I_{ef}(1) = I_{sp} + 100(d - 1.9),$$

$$I_{ef}(2) = I_{sp} + 50(d - 1.8),$$

$$I_{ef}(3) = I_{sp} + 25(d - 1.7).$$

Эти величины характеризуют баллистическую эффективность топлива на соответствующих ступенях РС.

Наличие алюминия в топливном составе приводит к потере I_{sp} из-за образования конденсированной фазы в продуктах сгорания, но цель настоящей работы заключалась в сравнении эффективности именно пластификаторов, поэтому мы проводили сравнение составов при одинаковом содержании алюминия или его гидрида и не учитывали двухфазные потери.

Базовые характеристики исследуемых тринитрометил-*ONN*-азокси-соединений (ΔH_f° и d) были оценены с применением расчетных методов. Энтальпии образования вначале были рассчитаны для газовой фазы $\Delta H_{f(\text{газ})}^\circ$ при помощи программного комплекса Gaussian 09 с использованием метода G4 для компонентов 1–7 и метода G4MP2 для компонентов 8–10. В основу расчета энтальпии сублимации $\Delta H_{f(\text{субл})}^\circ$ положено правило Трутона в соответствии с формулой

$$\Delta H_{f(\text{субл})}^\circ = 0.188T_{\text{пл}}, \text{ кДж/моль},$$

где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления в К [25]. Для еще не синтезированных структур принимали $T_{\text{пл}} = 325$ К. Стандартная энтальпия образования в конденсированной фазе в соответствии с законом Гесса определяется по формуле

$$\Delta H_{f(\text{конд})}^\circ = \Delta H_{f(\text{газ})}^\circ + \Delta H_{f(\text{субл})}^\circ.$$

Плотность изучаемых энергетических компонентов оценивали методом суммирования вкладов фрагментов молекул [26]. Полученные исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как было отмечено выше, мы исследовали три вида топливных композиций – с алюминием или его гидридом, а также без металла или его гидрида.

3.1. Составы: “25% гидрида алюминия, 27 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1:4) и АДНА (остальное)”

В табл. 2 приведены результаты расчетов этих составов в зависимости от вида пластификатора (1–10 тринитрометил-*ONN*-азокси-соединений из табл. 1, а также НГЦ, ДНФ и ТНМ). Результаты расчетов на рис. 2 и 3 представлены в виде гистограмм зависимости величин эффективных импульсов на второй и третьей ступенях $I_{ef}(2)$ и $I_{ef}(3)$ от вида пластификатора, поскольку на первой ступени РС топлива с гидридом алюминия малоэффективны.

Анализ полученных зависимостей показывает, что при замене ДНФ (лучшего из пластификато-

Таблица 2. Энергетические характеристики топлив, содержащих 25% ГА, 27 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4) и АДНА (остальное)

Пластификатор	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>d</i> ^д , г/см ³	<i>T</i> _с ^е , К	<i>I</i> _{сп} ^ж , с	<i>I</i> _{ef} (1) ^з , с	<i>I</i> _{ef} (2) ^и , с	<i>I</i> _{ef} (3) ^к , с
1	19.65	4.91	26.9	50.44	1.630	3670	279.3	252.3	270.8	277.6
2	20.10	5.03	26.9	49.88	1.641	3620	278.8	253.0	270.9	277.4
3	21.90	5.48	26.9	47.63	1.689	3630	278.3	257.2	272.8	278.0
4	22.25	5.56	26.9	47.19	1.698	3655	278.8	258.6	273.7	278.8
5	21.80	5.45	26.9	47.75	1.686	3665	278.6	257.2	272.9	278.3
6	20.55	5.14	27.0	49.31	1.652	3700	279.5	254.7	272.1	278.3
7	21.10	5.28	27.0	48.63	1.666	3730	278.8	255.5	272.1	278.0
8	21.55	5.39	26.9	48.06	1.679	3655	279.4	257.2	273.3	278.8
9	21.40	5.35	26.9	48.25	1.675	3630	279.4	256.9	273.2	278.8
10	22.60	5.65	26.9	46.75	1.708	3740	279.2	260.0	274.6	279.4
НГЦ	20.00	5.00	26.9	50.00	1.639	3610	276.8	250.7	268.8	275.3
ДНФ	20.20	5.05	27.0	49.75	1.643	3700	278.4	252.7	270.5	277.0
ТНМ	19.05	4.76	26.9	51.19	1.615	3780	277.7	249.2	268.5	275.6

^а Массовая доля пластификатора.
^б Массовая доля активного связующего ПВМТ.
^в Объемная доля смеси ПВМТ / пластификатор в соотношении 1 : 4.
^г Массовая доля динитрамида аммония.
^д Плотность композиции.
^е Температура горения.
^ж Удельный импульс.
^з Баллистическая эффективность на 1-й ступени РС.
^и Баллистическая эффективность на 2-й ступени РС.
^к Баллистическая эффективность на 3-й ступени РС.

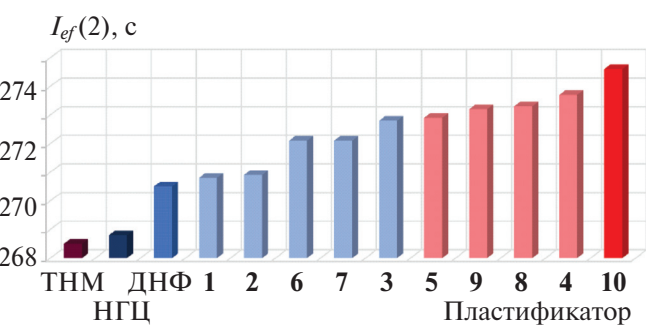


Рис. 2. Величины *I*_{ef}(2) составов, содержащих 25% ГА, 27 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), АДНА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

ров сравнения) на тринитрометил-*ОНН*-азокси-соединения повышается *I*_{ef}(2); максимальный прирост его достигает ~4 с в случае образца **10** и не менее 2.5 с при использовании веществ **4**, **5**, **8** и **9**. Такой прирост является значительной величиной, если принять во внимание, что заменяют компонент с содержанием его в композиции на уровне только 20%. В свою очередь, лучшую баллистическую эффективность по достигаемой величине *I*_{ef}(3) обеспечивают исследуемые пласти-

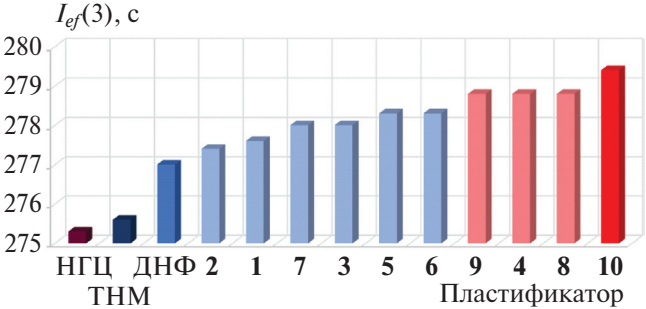


Рис. 3. Величины *I*_{ef}(3) составов, содержащих 25% ГА, 27 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), АДНА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

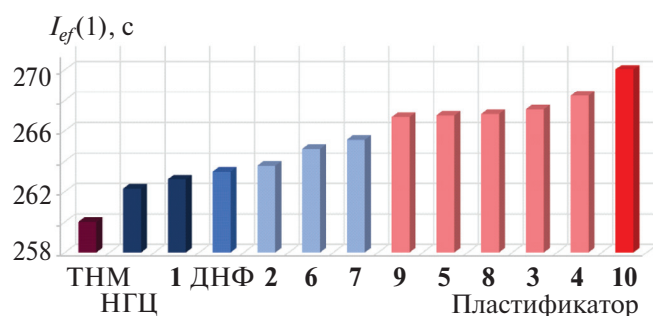
фикаторы **9**, **4**, **8**, а максимальную — компонент **10**.

3.2. Составы: “18% алюминия, 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное)”

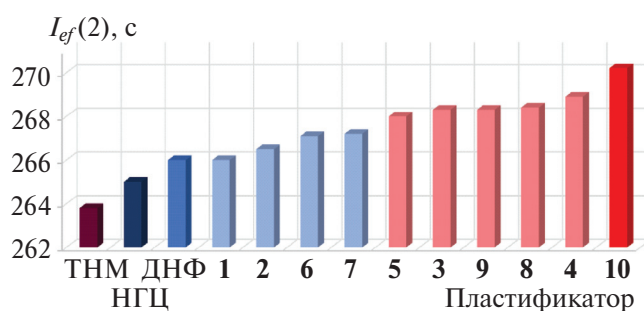
В табл. 3 приведены результаты расчетов для составов типа (*б*), в которых варьируется вид пластификатора (**1–10** тринитрометил-*ОНН*-азокси-

Таблица 3. Энергетические характеристики топлив, содержащих 18% Al, 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное)

Пласти- фикатор	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	d^{∂} , г/см ³	T_c^e , К	$I_{sp}^{жс}$, с	$I_{ef}(1)^3$, с	$I_{ef}(2)^u$, с	$I_{ef}(3)^к$, с
1	11.70	2.925	19.0	17.375	1.936	3860	259.2	262.8	266.0	265.1
2	12.00	3.000	19.1	17.000	1.945	3830	259.2	263.7	266.5	265.4
3	13.20	3.300	19.0	15.500	1.982	3830	259.2	267.4	268.3	266.2
4	13.40	3.350	19.0	15.250	1.989	3850	259.5	268.3	268.9	266.7
5	13.10	3.270	19.0	15.630	1.980	3860	259.1	267.0	268.0	266.1
6	12.25	3.062	19.0	16.688	1.954	3880	259.4	264.8	267.1	265.8
7	12.60	3.150	19.0	16.250	1.965	3900	259.0	265.4	267.2	265.6
8	12.95	3.238	19.0	15.812	1.974	3850	259.7	267.1	268.4	266.5
9	12.85	3.212	19.0	15.938	1.972	3840	259.7	266.9	268.3	266.5
10	13.65	3.412	19.0	14.938	1.997	3840	260.4	270.0	270.2	267.8
НГЦ	11.90	2.975	19.0	17.125	1.943	3820	257.9	262.2	265.0	264.0
ДНФ	12.00	3.000	19.0	17.000	1.947	3880	258.7	263.3	266.0	264.8
ТНМ	11.30	2.825	19.0	17.875	1.925	3920	257.5	260.0	263.8	263.1

^a Массовая доля пластификатора.^b Массовая доля активного связующего ПВМТ.^в Объемная доля смеси ПВМТ / пластификатор в соотношении 1 : 4.^г Массовая доля ПХА.^д Плотность композиции.^е Температура горения.^{жс} Удельный импульс.³ Баллистическая эффективность на 1-й ступени РС.^u Баллистическая эффективность на 2-й ступени РС.^к Баллистическая эффективность на 3-й ступени РС.Рис. 4. Величины $I_{ef}(1)$ составов, содержащих 18% алюминия, 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

соединений из табл. 1, НГЦ, ДНФ и ТНМ). Эти результаты представлены в виде гистограмм зависимости $I_{ef}(1)$, $I_{ef}(2)$ и $I_{ef}(3)$ от вида пластификатора на рис. 4–6. Анализ приведенных данных показывает, что замена пластификатора ДНФ на тринитрометил-*ONN*-азокси-соединения 2–10 повышает $I_{ef}(1)$, максимальный прирост которого достигает 6.5 с в случае образца 10 и 3.5–4 с при использовании веществ 3–5, 8 и 9. Прирост величины $I_{ef}(2)$ в результате замены пластификатора

Рис. 5. Величины $I_{ef}(2)$ составов, содержащих 18% алюминия, 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

ДНФ на тринитрометил-*ONN*-азокси-соединения 1–10 достигает максимального значения 4.3 с в случае образца 10, а вещества 3–5, 8 и 9 обеспечивают преимущество не менее чем 2 с.

В свою очередь, прирост величины $I_{ef}(3)$ в результате замены пластификатора ДНФ на тринитрометил-*ONN*-азокси-соединения 1–10 достигает 2.8 с также при использовании образца 10, а вещества 3, 4, 8 и 9 обеспечивают преимущество не менее чем 1.5 с. На всех трех ступенях РС новые пластификаторы 5, 3, 9 и 8 обеспечивают макси-

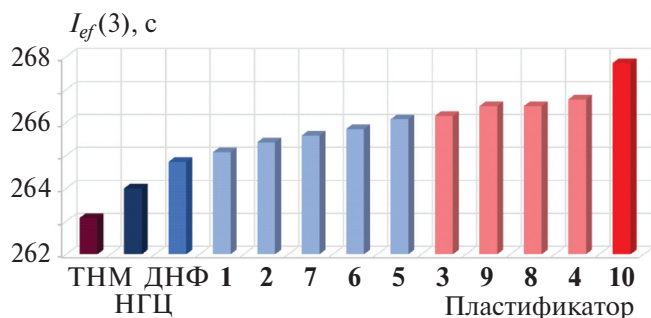


Рис. 6. Величины $I_{ef}(3)$ составов, содержащих 18% алюминия, 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1:4), 50% октогена и ПХА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

мальную баллистическую эффективность, а компоненты 4 и 10 — еще более высокую.

Чтобы объяснить, почему каждый из изучаемых пластификаторов обладает преимуществом или уступает в сравнении с другими образцами, был проведен статистический анализ. Такие свойства пластификатора, как энтальпия образования, плотность, коэффициент насыщенности кислородом и содержание водорода, каждое в отдельности, очевидным образом влияют на баллистическую эффективность всей топливной композиции, но изменение перечисленных базовых параметров конкретного компонента, как правило, приводит к изменению и других его характеристик. Поэтому мы провели математический анализ результатов расчета величин эффективных импульсов, представив их для каждой из исследованных систем (**a** — с гидридом алюминия, **b** — с алюминием и **c** — без алюминия или его гидроксида) на каждой из трех ступеней РС уравнением

$$I_{ef}(n)_{aj} = k_{a1} + k_{a2}H_j + k_{a3}\alpha_j + k_{a4}d_j + k_{a5}\Delta H_{f,j}^{\circ}, \quad (I)$$

где H_j — содержание водорода, d_j — плотность (в г/см³), $\Delta H_{f,j}^{\circ}$ (в кДж/кг) энтальпия образования j -го пластификатора. Индексы “a”, “b” и “c” характеризуют тип исследуемой системы. Также были составлены подобные уравнения для $I_{ef}(2)$ и $I_{ef}(3)$. Анализ зависимостей мы проводили методом линейного программирования с помощью графического пакета анализа данных SigmaPlot. В целом были проанализированы девять уравнений для трех ступеней РС ($I_{ef}(1)$, $I_{ef}(2)$ и $I_{ef}(3)$) и для трех типов составов (**a**, **b** и **c**).

В результате определены параметры этих уравнений. Средние отклонения величин $I_{ef}(n)$, рас-

считанные по уравнениям типа (I), от величин $I_{ef}(n)$, полученных в результате термодинамических расчетов и представленных в табл. 2–4, на всех трех ступенях РС составляют для систем **a** с гидридом алюминия 0.1 с, для систем **b** с алюминием — 0.15 с, а для систем **c** без металла — 0.3 с. Величины полученных коэффициентов k_1 – k_5 для топливных систем **a**, **b** и **c** на трех ступенях РС приведены в табл. 4.

Анализ величин коэффициентов k_i (табл. 4) позволяет сделать ряд выводов. Прежде всего, следует отметить, что влияние большинства параметров практически не зависит от ступени РС для составов с алюминием или его гидридом.

В изученных выше (см. табл. 2) составах с ГА вклад ΔH_f° пластификатора характеризуется коэффициентом k_5 , равным примерно 0.0014 для всех трех ступеней РС, и каждые 100 кДж/кг энтальпии пластификатора приводят к увеличению I_{ef} на ~0.15 с. При этом вклад величины α характеризуется коэффициентом k_3 — каждые 0.2 доли α пластификатора приводят к приросту I_{ef} на ~0.3 с. Вклад содержания водорода характеризуется коэффициентом k_2 — каждый процент водорода в пластификаторе приводит к росту I_{ef} на ~1.4 с. В то же время только влияние плотности, характеризующееся коэффициентом k_4 , существенно зависит от номера ступени РС, что вполне закономерно, и значительно снижается с ростом номера ступени (табл. 5).

В изученных выше (см. табл. 3) составах с Al прирост I_{ef} от увеличения энтальпии пластификатора (коэффициент k_5) незначительно ниже, чем в аналогичной системе с ГА (~0.0095 против ~0.0013 с соответственно). Вклад величины α (коэффициент k_3) также отличается от состава с ГА — каждые 0.2 доли α в пластификаторе приводят к увеличению I_{ef} на ~0.23 с, что на ~20% меньше, чем в аналогичных составах с ГА. Это может быть легко объяснено тем, что базовая композиция (**a**) с 25% ГА, включающая все компоненты кроме пластификатора, характеризуется весьма низкой величиной α (0.43), и при введении пластификатора НГЦ величина α хоть и повышается до ~0.53, но это все же несколько ниже оптимальных величин α (~0.7). С другой стороны, базовая рецептура с Al без пластификатора характеризуется более высокой величиной α (0.56), а с пластификатором НГЦ α повышается до ~0.61, т.е. составы с ГА в большей степени нуждаются в активном оки-

Таблица 4. Вычисленные коэффициенты k_i в уравнении (I) для составов a , b и c

Коэффициенты	Номер ступени	Тип состава		
		$a - c$ ГА	$b - c$ АІ	$c -$ без АІ или ГА
k_1	1	220.6	234.4	216.1
	2	252.6	248.2	234.1
	3	266.4	252.5	240.6
k_2	1	1.382	1.220	1.42
	2	1.415	1.231	1.43
	3	1.405	1.236	1.43
k_3	1	1.364	1.090	-0.34
	2	1.439	1.147	-0.27
	3	1.458	1.175	-0.27
k_4	1	17.48	15.96	16.79
	2	8.64	9.07	10.25
	3	4.11	5.62	6.98
k_5	1	1.3×10^{-3}	9.45×10^{-4}	1.21×10^{-3}
	2	1.3×10^{-3}	9.07×10^{-4}	1.22×10^{-3}
	3	1.4×10^{-3}	9.59×10^{-4}	1.20×10^{-3}

Таблица 5. Энергетические характеристики топлив, содержащих 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное)

Пластификатор	a	b	v	z	d^{∂} , г/см ³	T_c^e , К	$I_{sp}^{жс}$, с	$I_{ef}(1)^3$, с	$I_{ef}(2)^u$, с	$I_{ef}(3)^k$, с
1	12.30	3.0750	19.0	34.63	1.841	3230	250.6	244.6	252.6	254.1
2	12.60	3.1500	19.0	34.25	1.849	3250	251.1	246.0	253.5	254.8
3	13.85	3.4625	19.0	32.69	1.884	3250	251.0	249.4	255.2	255.6
4	14.05	3.5125	19.0	32.44	1.891	3250	251.2	250.3	255.8	256.0
5	13.80	3.4500	19.0	32.75	1.882	3270	251.3	249.4	255.3	255.8
6	12.85	3.2125	19.0	33.94	1.857	3260	251.0	246.7	253.9	254.9
7	13.25	3.3125	19.0	33.44	1.868	3250	250.2	247.0	253.6	254.4
8	13.60	3.4000	19.0	33.00	1.877	3260	251.5	249.2	255.4	255.9
9	13.50	3.3750	19.0	33.13	1.874	3255	251.6	249.0	255.3	255.9
10	14.35	3.5875	19.0	32.06	1.898	3270	251.4	251.2	256.3	256.4
НГЦ	12.50	3.1250	19.0	34.38	1.847	3200	249.3	244.0	251.7	253.0
ДНФ	12.65	3.1625	19.0	34.19	1.850	3250	250.2	245.3	252.8	254.0
ТНМ	11.85	2.9625	19.0	35.19	1.830	3195	246.5	239.4	247.9	249.7

^a Массовая доля пластификатора.^b Массовая доля активного связующего ПВМТ.^c Объемная доля смеси ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4.^d Массовая доля ПХА.^e Плотность композиции.^f Температура горения.^{жс} Удельный импульс.³ Баллистическая эффективность на 1-ой ступени РС.^u Баллистическая эффективность на 2-ой ступени РС.^k Баллистическая эффективность на 3-ей ступени РС.

слителе, чем составы с Al. В свою очередь, влияние содержания водорода в составах с Al (коэффициент k_2) высоко — каждый дополнительный процент водорода в пластификаторе приводит к росту I_{ef} на ~ 1.25 с, что примерно на 10% ниже, чем в составах с ГА.

3.3. Составы без металла с высоким содержанием октогена и активным связующим

Для многих задач требуется использовать топлива, не имеющие конденсированных продуктов сгорания, т.е. без металлов или их гидридов. Простейшей рецептурой безметалльной композиции является смесь окислителя, например ПХА, с углеводородным связующим (УС), например УС ($H_{119.2}C_{72.15}O_{0.68}$; $\Delta H_f^\circ = -393$ кДж/кг; $d = 0.92$ [17]). Состав “10% УС + 90% ПХА (объемная доля связующего — 19 об.%)” характеризуется следующими параметрами: $I_{sp} = 240.4$ с; $d = 1.754$ г/см³; $I_{ef}(1) = 226.0$ с; $I_{ef}(2) = 238.0$ с; $I_{ef}(3) = 241.7$ с. Использование активного связующего с ПХА в этом случае совсем неэффективно, поскольку содержание кислорода во всей рецептуре значительно выше оптимального. Однако замена большей части ПХА ($\alpha = 2.25$) в композиции с октогеном ($\alpha = 0.67$) с применением активного связующего позволяет получить существенно более высокие показатели, например, состав “3.125% ПВМТ + + 13.5% НГЦ + 50% октоген + 34.38% ПХА (объемная доля связующего — также 19%)” обеспечивает следующие характеристики: $I_{sp} = 249.3$ с; $d = 1.847$ г/см³; $I_{ef}(1) = 244.0$ с; $I_{ef}(2) = 251.7$ с; $I_{ef}(3) = 253.0$ с.

Полезно было изучить, как повлияет замена НГЦ или ДНФ в последней рецептуре на изучаемые тринитрометил-ОНН-азокси-производные при сохранении объемной доли связующего на уровне 19% при том же соотношении его компонентов (табл. 5). Полученные результаты расчетов представлены в виде гистограмм на рис. 7–9, анализ которых показывает, что ДНФ обеспечивает энергетические характеристики немного более высокие, чем НГЦ.

Прирост величин $I_{ef}(1)$, $I_{ef}(2)$ и $I_{ef}(3)$ при замене ДНФ тринитрометил-ОНН-азокси-соединениями достигает 6, 3.5 и 2.5 с соответственно в случае компонента **10**, при этом пять из изучаемых новых образцов **3–5** и **8–10** обеспечивают преимущество по сравнению с ДНФ не менее, чем 4, 2 и 1.5 с соответственно. На первых двух ступенях РС пла-

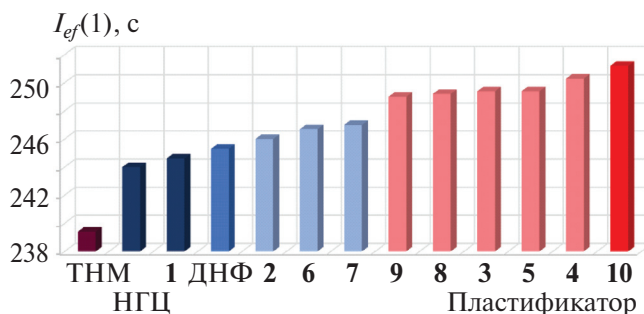


Рис. 7. Величины $I_{ef}(1)$ составов, содержащих 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

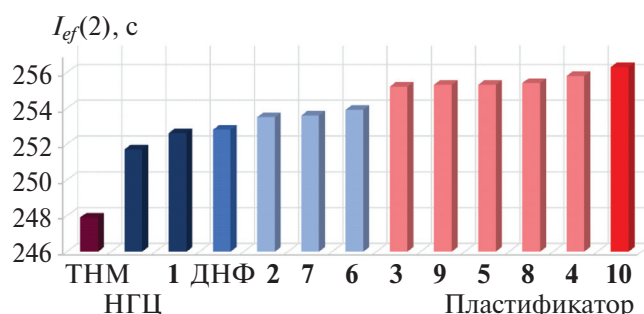


Рис. 8. Величины $I_{ef}(2)$ составов, содержащих 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

стификаторы обеспечивают приблизительно равную максимальную баллистическую эффективность, а пластификаторы **4** и **10** — более высокую. На 3-ей ступени компонент **10** превосходит по эффективности лишь на ~ 0.5 с образцы **4**, **5**, **8** и **9**.

Обработка данных табл. 5 в соответствии с тем же алгоритмом, что был описан выше, т.е. поиск коэффициентов k_1 – k_5 уравнения (I) для оценки того, как параметры пластификатора влияют на энергетические характеристики топлив, содержащих 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор 1 : 4), 50% октогена и ПХА (остальное), показал интересный результат (табл. 4). Коэффициенты k_2 , k_4 и k_5 , характеризующие вклады содержания водорода, плотности и ΔH_f° , достаточно близки к тем, что были показаны для составов с алюминием или его гидридом, однако обращает на себя внимание тот факт, что k_3 , характеризующий зависимость от α , есть величина отрицательная, пусть и небольшая (приблизительно равная -0.3). Это означает, что если α пластификатора увеличится, например, на 0.5 при прочих равных условиях, то величины $I_{ef}(n)$ снизятся на 0.15 с, что ниже уровня погрешности, обеспечиваемого ме-

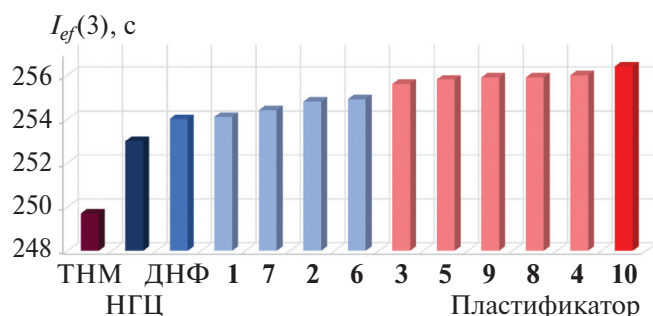


Рис. 9. Величины $I_{ef}(3)$ составов, содержащих 19 об.% связующего (ПВМТ/пластификатор в соотношении 1:4), 50% октогена и ПХА (остальное), в зависимости от вида пластификатора.

тодом обработки имеющихся результатов расчетов. Почему же так снизилось влияние α при переходе от составов на основе алюминия или его гидрида к безметалльным композициям? Очевидно, это связано с тем, что в базовых рецептурах с алюминием или его гидридом величины α составляют 0.56 и 0.42 соответственно, тогда как в составах без металла $\alpha = 0.91$, что даже выше оптимального, т.е. в такой рецептуре нет необходимости увеличивать именно α пластификатора. Таким образом, наиболее эффективные из изученных образцов на основе тринитрометил-*ONN*-азокси-производных в исследуемых составах без металла обладают преимуществом по сравнению с пластификаторами сравнения, в основном за счет повышенных значений энтальпии образования и плотности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью термодинамических расчетов проведено исследование энергетического потенциала представителей класса тринитрометил-*ONN*-азоксифуразанов в качестве пластификаторов активного связующего СТТ, содержащих алюминий или гидрид алюминия, а также в безметалльных топливных композициях. Установлены эмпирические зависимости величин $I_{ef}(n)$ для трех типов изученных топливных композиций от энтальпии образования, плотности, содержания водорода и величины коэффициента насыщения кислородом пластификатора.

Проведенные исследования показали, что предложенные структуры являются высокоэффективными энергоемкими компонентами, обеспечивающими в СТТ высокие значения удельного и эффективного импульсов в составах: без металлосодержащих добавок — до 256 с, с алюминием —

до 268 с, с гидридом алюминия — до 280 с. Они не только обладают значительным преимуществом в сравнении с уровнем таких пластификаторов, как тетранитрометан и нитроглицерин, но также превосходят аналогичные характеристики составов с наиболее мощным перспективным пластификатором СТТ — динитрофуразаном, преимущество новых пластификаторов над которым достигает 6, 7 и 4 с соответственно.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о перспективности поиска новых высокоэффективных компонентов СТТ в ряду тринитрометил-*ONN*-азокси-производных высокоэнтальпийных гетероциклических соединений.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова (проекты 2065, 2312 и 2331).

Работы проводились по темам госзадания (темы № АААА-А19-119101690058-9 и № АААА-А19-119120690042-9). Расчеты ресурсоемкими методами осуществлялись за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-71-00005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лемперт Д.Б., Нечипоренко Г.Н., Согласнова С.И. // Хим. физика. 1999. Т. 18. С. 86.
2. Лемперт Д.Б., Нечипоренко Г.Н., Согласнова С.И. // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. С. 58. <https://doi.org/10.1007/s10573-009-0021-9>
3. Lempert D., Kazakov A., Sheremetev A. // Mendeleev Commun. 2022. V. 32. P. 601. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.09.010>
4. Luk'yanov O.A., Salamonov Y.B., Struchkov Y.T., Burtshev Y.N., Kuz'min V.S. // Mendeleev Commun. 1992. V. 2. P. 52. <https://doi.org/10.1070/MC1992v002n02ABEN000127>
5. Лукьянов О.А., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В., Шлыкова Н.И., Саламонов Ю.Б. // Изв. АН. Сер. хим. 2009. № 10. С. 2000. <https://doi.org/10.1007/s11172-009-0283-0>
6. Лукьянов О.А., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В., Шлыкова Н.И., Шагаева М.Е. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 8. С. 1678. <https://doi.org/10.1007/s11172-011-0254-0>
7. Лукьянов О.А., Парахин В.В., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В. // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 2. С. 353. <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0049-y>
8. Лукьянов О.А., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В., Шлыкова Н.И. // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 2. С. 358. <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0050-5>

9. Лукьянов О.А., Парахин В.В. // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 8. С. 1566.
<https://doi.org/10.1007/s11172-012-0210-7>
10. Лукьянов О.А., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В. // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 9. С. 1767.
<https://doi.org/10.1007/s11172-012-0245-9>
11. Парахин В.В., Лукьянов О.А. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 2. С. 514.
<https://doi.org/10.1007/s11172-013-0071-8>
12. Парахин В.В., Лукьянов О.А. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 9. С. 2007.
<https://doi.org/10.1007/s11172-013-0291-y>
13. Лукьянов О.А., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В., Шлыкова Н.И. // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 1. С. 83.
<https://doi.org/10.1007/s11172-015-0824-7>
14. Лукьянов О.А., Похвиснева Г.В., Терникова Т.В., // Там же. 2015. № 1. С. 137.
<https://doi.org/10.1007/s11172-015-0832-7>
15. Zhang J., Bi F., Lian P., Zhang J., Wang B. // Chin. J. Org. Chem. 2017. V. 37. № 10. P. 2736.
16. <https://doi.org/10.6023/cjoc201701014> Лукьянов О.А., Парахин В.В. 3-(Тринитрометил-ОНN-азокси)-4-нитраминофуразаны и способы их получения: Патент. РФ 2485108. // Б.И. 2013. № 17.
17. Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Manelis G.B. // Cent. Eur. J. Energ. Mater. 2006. V. 3. P. 73.
18. Трусев Б.Г. // Тез. докл. Междунар. конф. по хим. термодинамике. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 2002. С. 483.
19. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 34.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2201006X>
20. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 52.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20090149>
21. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 7. С. 24.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2107013X>
22. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 45.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2209014X>
23. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 12. С. 36.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22120123>
24. Павловец Г.Я., Цуцуран В.И. Физико-химические свойства порохов и ракетных топлив. М.: Изд-во Министерства обороны, 2009.
25. Westwell M.S., Searle M.S., Wales D.J., Williams D. // J. Amer. Chem. Soc. 1995. V. 117. № 18. P. 5013.
<https://doi.org/10.1021/ja00123a001>
26. Котомин А.А., Козлов А.С. Плотность органических соединений. Метод расчета плотности по вкладам фрагментов молекул: Учеб. пособие. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2005.
27. Voevodin V.V., Antonov A.S., Nikitenko D.A. et al. // Supercomput. Front. Innov. 2019. V. 6. № 2. P. 4.
<https://doi.org/10.14529/jsfi190201>
28. Воеводин В., Жуматий С., Соболев С. и др. // Открытые системы. СУБД. 2012. Т. 7. С. 36.
29. Nikitenko D., Voevodin V., Zhumatiy S. // Supercomput. Front. Innov. 2018. V. 5. № 2. P. 4.
<https://doi.org/10.14529/jsfi180201>

SOME HIGH-ENERGY TRINITROMETHYL-ONN-FURAZANS AS BINDER PLASTICIZERS IN MODEL SOLID COMPOSITE PROPELLANTS

V. V. Parakhin¹, V. M. Volokhov², E. S. Amosova², I. I. Akostelov³, D. B. Lempert^{2*}

¹Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*E-mail: lempert@icp.ac.ru

To identify promising areas for the search for high-energy materials, a comprehensive analysis of the energy potential of compounds of various classes is an urgent need. This work is devoted to the study of the energy potential of some organic compounds containing the $-N=N(O)-C(NO_2)_3$ fragment in their structure as plasticizers of a polymeric binder in solid composite propellants. Nine trinitromethyl-ONN-azoxy-derivatives of furazan and one similar methane compound were studied, four of which are actually synthesized substances, the rest are still hypothetical structures. The ballistic efficiency of solid composite propellants of three different types (without metal, with aluminum and with aluminum hydride), in which one of the studied compounds with a trinitromethyl-ONN-azoxy fragment acts as a plasticizer of the polymer binder, the values of the enthalpy of formation and density of which were determined by the calculated way, and a comparison of the ballistic efficiency of such propellants with similar compositions containing the most powerful of the currently considered energy-intensive components as a plasticizer: nitroglycerin, tetranitromethane, or dinitrofurazan. It has been shown that practically all the studied representatives of the class of trinitromethyl-ONN-diazeno oxides are significantly superior in terms of ballistic efficiency to the reference plasticizers.

Keywords: trinitromethyl-ONN-azoxy compounds, solid composite propellants (SCP), plasticizer, enthalpy of formation, density, thermodynamic calculations, specific impulse, effective impulse.

REFERENCES

1. Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Soglasnova S.I. // Khim. Fiz. 1999. V. 18. P. 86.
2. Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Soglasnova S.I. // Comb. Explos. Shock Waves. 2009. V. 45. P. 160. <https://doi.org/10.1007/s10573-009-0021-9>
3. Lempert D., Kazakov A., Sheremetev A. // Mendelev Commun. 2022. V. 32. P. 601. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.09.010>
4. Luk'yanov O.A., Salamonov Y.B., Struchkov Y.T., Burtshev Y.N., Kuz'min V.S. // Mendelev Commun. 1992. V. 2. P. 52. <https://doi.org/10.1070/MC1992v002n02ABEH000127>
5. Luk'yanov O.A., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V., Shlykova N.I., Salamonov Yu.B. // Russ. Chem. Bull. 2009. V. 58. P. 2063. <https://doi.org/10.1007/s11172-009-0283-0>
6. Luk'yanov O.A., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V., Shlykova N.I., Shagayeva M.E. // Russ. Chem. Bull. 2011. V. 60. P. 1703. <https://doi.org/10.1007/s11172-011-0254-0>
7. Luk'yanov O.A., Parakhin V.V., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V. // Russ. Chem. Bull. 2012. V. 61. P. 355. <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0049-y>
8. Luk'yanov O.A., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V., Shlykova N.I. // Russ. Chem. Bull. 2012. V. 61. P. 360. <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0050-5>
9. Luk'yanov O.A., Parakhin V.V. // Russ. Chem. Bull. 2012. V. 61. P. 1582. <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0210-7>
10. Luk'yanov O.A., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V. // Russ. Chem. Bull. 2012. V. 61. P. 1783. <https://doi.org/10.1007/s11172-012-0245-9>
11. Parakhin V.V., Luk'yanov O.A. // Russ. Chem. Bull. 2013. V. 62. P. 516. <https://doi.org/10.1007/s11172-013-0071-8>
12. Parakhin V.V., Luk'yanov O.A. // Russ. Chem. Bull. 2013, V. 62. P. 2007. <https://doi.org/10.1007/s11172-013-0291-y>
13. Luk'yanov O.A., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V., Shlykova N.I. // Russ. Chem. Bull. 2015. V. 64. P. 83. <https://doi.org/10.1007/s11172-015-0824-7D>
14. Luk'yanov O.A., Pokhvisneva G.V., Ternikova T.V., Shlykova N.I. // Russ. Chem. Bull. 2015. V. 64. P. 137. <https://doi.org/10.1007/s11172-015-0832-7>
15. Zhang J., Bi F., Lian P., Zhang J., Wang B. // Chin. J. Org. Chem. 2017. V. 37. P. 2736. <https://doi.org/10.6023/cjoc201701014>
16. Luk'yanov O.A., Parakhin V.V. 3-(trinitromethyl-ONN-azoxy)-4-nitraminofurazans and methods for production thereof. Patent of Russian Federation 2455108. 2013.
17. Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Manelis G.B. // Cent. Eur. J. Energ. Mater. 2006. V. 3. P. 73.
18. Trusov B.G. // XIV International Symposium on Chemical Thermodynamics. St. Petersburg. 2002. P. 483.
19. Gudkova I.Yu., Zyuzin I.N., Lempert D.B. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. V. 16. P. 58. <https://doi.org/10.1134/S1990793122010067>
20. Zyuzin I.N., Gudkova I.Yu., Lempert D.B. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2020. V. 14. P. 804. <https://doi.org/10.1134/S1990793120050140>

21. Zyuzin I.N., Gudkova I.Yu., Lempert D.B. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2021. V. 15. P. 611.
<https://doi.org/10.1134/S1990793121040138>
22. Zyuzin I.N., Gudkova I.Yu., Lempert D.B. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. V. 16. P. 902.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122050141>
23. Zyuzin I.N., Gudkova I.Yu., Lempert D.B. // Russ. J. Phys. Chem. B. 2022. V. 16. P. 902.
<https://doi.org/10.1134/S1990793122050141>
24. Pavlovets G.Ya., Tsutsuran V.I. Physical and Chemical Properties of Gunpowders and Rocket Propellants. Moscow: Minist. Oborony, 2009 [in Russian].
25. Westwell M.S., Searle M.S., Wales D.J., Williams D. // J. Am. Chem. Soc. 1995. V. 117. P. 5013.
<https://doi.org/10.1021/ja00123a001>
26. Kotomin A.A., Kozlov A.S. Density of organic compounds. Calculation of density from contributions of molecular fragments. Saint-Petersburg: St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2005 [in Russian].
27. Voevodin V.V., Antonov A.S., Nikitenko D.A. et al. // Supercomput. Front. Innov. 2019. V. 6. № 2. P. 4.
<https://doi.org/10.14529/jsfi190201>
28. Voevodin V., Zhumatiy S., Sobolev S. et al. // Otkrytye sistemy. SUBD [in Russian]. 2012. V. 7. P. 36.
29. Nikitenko D., Voevodin V., Zhumatiy S. // Supercomput. Front. Innov. 2018. V. 5. № 2. P. 4.
<https://doi.org/10.14529/jsfi180201>