

УДК 541.11:547.235.5

## ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИММЕТРИЧНЫХ НИТРО- И АЗИДОПРОИЗВОДНЫХ ДИАЗЕН-ТЕР-ФУРАЗАНОВ

Д. Б. Лемперт<sup>1</sup>, А. И. Казаков<sup>1</sup>, В. С. Санников<sup>2</sup>, А. В. Набатова<sup>1</sup>,  
Д. В. Дашко<sup>2</sup>, А. И. Степанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, lempert@icp.ac.ru

<sup>2</sup>СКТБ «Технолог», 193076 Санкт-Петербург

Впервые экспериментально определены теплота сгорания и энтальпия образования бис(4''-нитро[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-диазена (DNFNF) и (бис(4''-азидо-[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-диазена (DAzFNF). Найдено, что энергетический инкремент замещения нитрогруппы на азидную группу в фуразановом цикле составляет в среднем 290 кДж/моль и близок к инкременту аналогичного замещения —NO<sub>2</sub> на —N<sub>3</sub> в тринитроэтаноле. Проведен термодинамический анализ зависимости энергетических параметров ракетных топлив без металла с активным связующим и смесью перхлората аммония с DNFNF или с DAzFNF в зависимости от содержания высокоэнтальпийного компонента в рецептуре.

Ключевые слова: бис(4''-нитро[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-дiazен, бис(4''-азидо-[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-дiazен, энтальпия сгорания, энтальпия образования, парциальный вклад, смесевое твердое ракетное топливо (СТРТ), удельный импульс.

DOI 10.15372/FGV20200306

### ВВЕДЕНИЕ

Ряд производных 1,2,5-оксадиазола(фуразана) и 1,2,5-оксадиазола-2-оксида (фуроксана), содержащих высокоэнтальпийные или окислительные фрагменты, представляют несомненный интерес в плане их использования в качестве высокоэнергетических высокоплотных соединений [1–8].

Ранее нами было показано [9], что нитропроизводные тер-1,2,5-оксадиазола: 3,4-бис(4-нитрофуразан-3-ил)фуразан (DNTF) и 3,4-бис(4-нитрофуразан-3-ил)фуроксан (DNFF) (рис. 1) — могут стать базой для смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ) в качестве энергоемких наполнителей.

Коэффициент насыщенности кислородом  $\alpha = 2O/(4C + H)$  азидопроизводных вышеупомянутых DNFF и DNTF, DAzFF и AzNTF [10] существенно ниже, чем у DNTF и DNFF. Однако за счет существенно более высокой энтальпии образования ( $\Delta H_f^0$ )

они также могут быть эффективно использованы в качестве компонентов СТРТ, но уже не основным компонентом окислителя, а вспомогательным к основному окислителю с высоким значением  $\alpha$ , например к перхлорату аммония (ПХА). Было показано [10], что композиции СТРТ, содержащие 3,4-бис(4-азидофуразан-3-ил)фуроксан (DAzFF) или 4-азидо-4''-нитро[3,3':4',3'']терфуразан (AzNTF) без металла с активным связующим и с ПХА в качестве основного окислителя, характеризуются более высокими энергетическими параметрами, чем составы с октогеном и активным связующим, при этом оптимальное содержание DAzFF или AzNTF в рецептурах имеет место при относительно невысоком содержании взрывчатого вещества, каковыми являются октоген, DAzFF и AzNTF.

В настоящей работе изучены термохимические и энергетические характеристики соединений DNFNF (бис(4''-нитро[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-дiazен) и DAzFNF (бис(4''-азидо-[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-дiazен) (рис. 2), в которых два терфуразановых фрагмента связаны азогруппой.

DNFNF представляет собой два фрагмента нитротрифуразана, соединенных мости-

Работа выполнена на средства ИПХФ РАН по теме 0089-2014-0019 «Создание высокоэнергетических материалов и технологий для разрабатываемых и перспективных систем».

© Лемперт Д. Б., Казаков А. И., Санников В. С.,  
Набатова А. В., Дашко Д. В., Степанов А. И., 2020.

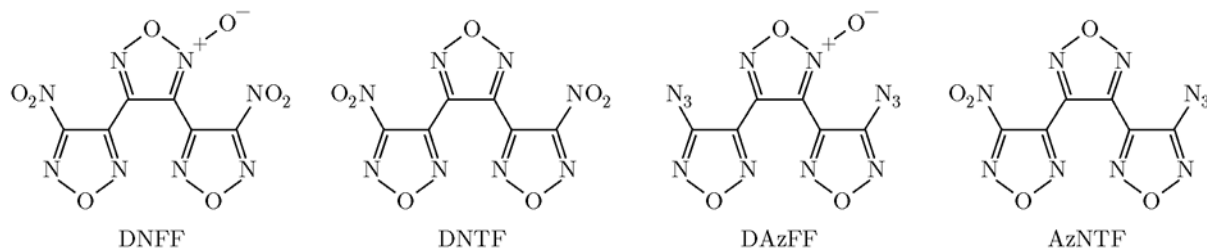


Рис. 1. Структурные формулы DNFF и DNTF, DAzFF и AzNTF

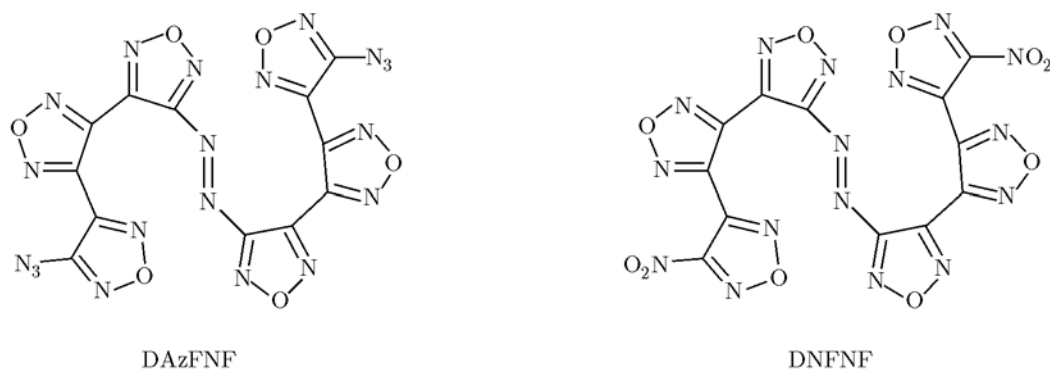


Рис. 2. Структурные формулы DAzFNF и DNFNF

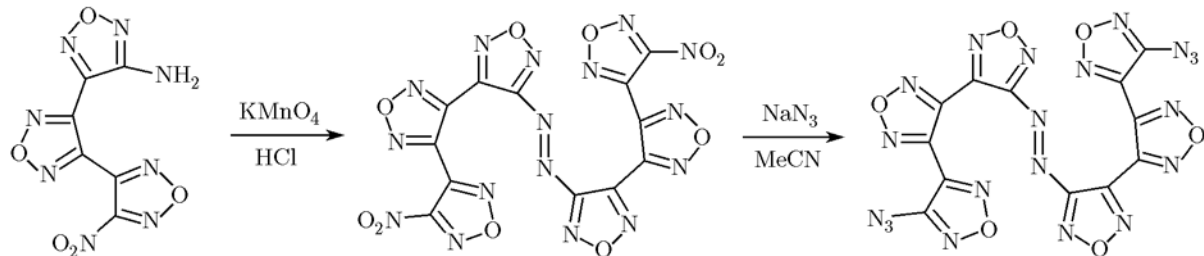


Рис. 3. Схема синтеза DAzFNF и DNFNF

ком  $\text{—N=N—}$ , а DAzFNF — два фрагмента азидотрифуразана, соединенных мостиком  $\text{—N=N—}$ . Естественно, DNFNF отличается от DNFF и DNTF существенно более низким коэффициентом  $\alpha$ , но повышенной энтальпией образования. Таково же и отличие DAzFNF от AzNTF. Предыдущий опыт показал, что такие переходы, как DNTF  $\rightarrow$  DNFNF и AzNTF  $\rightarrow$  DAzFNF, снижают эффективность соединения в качестве компонента СТРТ, но при этом существуют задачи, реально стоящие перед химией ракетных топлив, которые можно решить с помощью компонентов с меньшей величиной  $\alpha$ , но с более высоким значением  $\Delta H_f^0$ .

В данной работе проведено экспериментальное определение теплот сгорания и обра-

зования DAzFNF и DNFNF и на их основе рассчитаны энергетические и баллистические характеристики рецептур СТРТ без металла, на базе активного связующего и смеси ПХА с DAzFNF или DNFNF.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 1.1. Синтез DAzFNF и DNFNF и их свойства

DAzFNF синтезирован замещением нитрогрупп молекулы DNFNF на азидогруппы обработкой последнего  $\text{NaN}_3$  в ацетонитриле согласно [11]; DNFNF синтезирован согласно [12] окислением  $\text{KMnO}_4$  аминогруппы 4''-нитро[3,3':4',3''']трифуразан-4-амина (ANTF) [13] (схема на рис. 3).

Поскольку степень чистоты исследуемых компонентов существенно влияет на полученный результат, нами были отработаны методы получения прецизионно чистых образцов DAzFNF и DNFNF, включающие в себя переосаждение продуктов из азотной кислоты и последующую трехкратную перекристаллизацию из водной уксусной кислоты. Удаление остаточных растворителей осуществлялось сушкой в вакууме ( $15 \div 20$  Торр) при  $90^\circ\text{C}$ . Чистота полученных соединений контролировалась с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии. Содержание примесей не превышало 0.1 %. Анализ образцов проводился на хроматографе Shimadzu с диодно-матричным детектором серии 20 при температуре разделения и детектирования  $40^\circ\text{C}$ . Колонка Luna C18(2)  $250 \times 4.6 \times 5 \mu$  («Phenomenex», США). Подвижная фаза: 70 % MeCN и 30 %  $\text{H}_2\text{O}$ , скорость подачи элюента 0.8 мл/мин. Детектирование осуществлялось на длинах волн 209, 230 и 254 нм.

### 1.2. Экспериментальное определение теплоты сгорания и энтальпии образования DAzFNF и DNFNF

Калориметрическое измерение энергии сгорания DAzFNF и DNFNF выполняли на прецизионном автоматическом калориметре сжигания АБК-1В конструкции лаборатории термодинамики Института химической физики РАН [13]. Тепловое значение калориметра  $W = 5436.6 \pm 0.6$  Дж/К определяли сжиганием эталонной бензойной кислоты марки К-3 производства ВНИИ метрологии им. Д. И. Менделеева. Энергия сгорания эталонного образца бензойной кислоты (ГСО 5504 90) в стандартных условиях равна  $26434 \pm 5$  Дж/г.

В качестве вспомогательного вещества при сжигании применяли бензойную кислоту. Перед проведением эксперимента в бомбу ввели 1 мл дистиллированной воды для растворения азотной кислоты, образующейся в побочной реакции в процессе сгорания, и для создания давления насыщенного пара, чтобы вся образующаяся при горении вещества вода находилась в жидком состоянии. Начальное давление кислорода в бомбе составляло 2.94 МПа. По окончании опытов бомбу вскрывали и промывали дистиллированной водой. Полученный раствор титровали 0.1 н раствором гидроксида калия. По результатам анализов вводили поправку на теплоту реакции образования азот-

ной кислоты в продуктах реакции. Образцы взвешивали на весах ВЛР-20 с погрешностью 0.025 мг. Сгорание соединений в условиях бомбы было полным, т. е. без остатков несгоревшего углерода или иных углеродистых соединений.

Энергия сгорания соединений в условиях бомбы при постоянном объеме рассчитывалась встроенной программой персонального компьютера, входящего в комплект калориметра, согласно уравнению

$$-\Delta U_b = (Q - q_{\text{HNO}_3} - q_t - q_{ba} - q_{ign})/m_s,$$

где  $m_s$  — масса вещества, приведенная к массе в вакууме,  $Q = W\Delta T$  — общее количество тепла, выделившегося в результате опыта,  $\Delta T$  — подъем температуры с учетом поправки на теплообмен,  $q_{\text{HNO}_3}$  — поправка на образование азотной кислоты в продуктах реакции сгорания,  $q_t$  — энергия сгорания хлопчатобумажной нити,  $q_{ign}$  — энергия поджига,  $q_{ba}$  — поправка на теплоту сгорания бензойной кислоты. Для расчета перечисленных выше поправок использовались следующие вспомогательные данные по теплоте сгорания веществ в условиях бомбы, определенные в отдельных опытах: для бензойной кислоты —  $26442.1 \pm 5.2$  Дж/г, хлопчатобумажной нити —  $16336.4 \pm 6.3$  Дж/г. Теплота образования раствора азотной кислоты в бомбе равна 58000.0 Дж/моль [14]. Энергия поджига во всех экспериментах равнялась 16 Дж.

В таблице представлены результаты по теплоте сгорания DAzFNF и DNFNF.

Средние значения теплоты сгорания DAzFNF и DNFNF в стандартных условиях  $-\Delta U^0$ , рассчитанные с учетом поправки Уошберна [15], равны  $6927.5 \pm 5.7$  и  $6363.0 \pm 5.1$  кДж/моль соответственно.

Погрешность полученных результатов вычисляли по формуле  $\sigma = k\sqrt{\sum x^2/[N/(N-1)]}$  для 95%-го доверительного интервала, где  $x$  — отклонение каждого результата от среднеарифметического,  $N$  — число опытов,  $k$  — соответствующий коэффициент Стьюдента.

### 1.3. Оценка характеристик DAzFNF и DNFNF

Анализ энергетических возможностей СТРТ на базе изучаемых соединений проводили по алгоритму, подробно описанному в [16, 17], с расчетом удельного импульса  $I_{sp}$  и температур горения  $T_c$  (при давлении в

Результаты экспериментов по определению теплоты сгорания DAzFNF и DNFNF

№ п/п	$m_s$ , г	$Q$	$q_t$	$q_{HNO_3}$	$q_{ba}$	$-\Delta U_b$ , Дж/г	$-\Delta U_c^0$ , кДж/моль
		Дж					
DAzFNF							
1	0.09785	10 907.7	30.3	24.8	9 544.7	13 368.5	6 936.1
2	0.09696	10 908.0	28.4	28.1	9 556.0	13 361.0	6 932.1
3	0.09809	10 887.6	28.7	29.0	9 520.4	13 350.3	6 926.6
4	0.09866	10 949.8	32.4	27.6	9 573.3	13 344.9	6 923.8
5	0.09842	11 022.4	34.3	23.8	9 651.2	13 341.8	6 922.2
6	0.09661	10 733.0	28.4	22.9	9 392.3	13 346.1	6 924.3
DNFNF							
1	0.10056	10 866.9	28.6	27.1	9 596.2	12 082.0	6 363.9
2	0.10010	10 764.0	31.8	23.6	9 488.1	12 084.5	6 365.3
3	0.09601	10 780.3	31.8	25.3	9 565.1	12 063.8	6 353.9
4	0.09953	10 861.8	29.7	24.8	9 604.9	12 080.7	6 363.2
5	0.09936	10 789.3	30.3	26.7	9 531.9	12 081.3	6 363.5
6	0.10227	10 837.2	27.1	26.7	9 547.0	12 089.7	6 368.2

камере сгорания и на срезе сопла 4.0 и 0.1 МПа соответственно) по программе термодинамических равновесий TERRA [18]. Поскольку помимо  $I_{sp}$  на баллистическую эффективность влияет и плотность СТРТ  $\rho$  (причем вклад плотности разный на различных ступенях ракетной системы), то для сравнения используют эффективный удельный импульс  $I_{ef}(n)$ , где  $n$  — номер ступени (1–3), рассчитываемый по формулам [19]

$$I_{ef}(1) = I_{sp} + 100(\rho - 1.9), \quad (1)$$

$$I_{ef}(2) = I_{sp} + 50(\rho - 1.8), \quad (2)$$

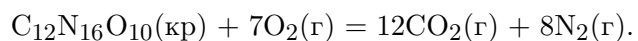
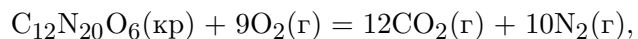
$$I_{ef}(3) = I_{sp} + 25(\rho - 1.7). \quad (3)$$

В данной работе мы вели сравнение только по величинам  $I_{ef}(2)$  и  $I_{ef}(3)$ , так как высокоимпульсные топливные композиции, тем более содержащие чувствительные компоненты, разумно применять только на верхних ступенях.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 2.1. Термодинамические параметры DAzFNF и DNFNF

Уравнения реакции сгорания DAzFNF и DNFNF имеют следующий вид:



По среднему значению  $\Delta U^0$  с учетом поправки на работу расширения газов в бомбе  $\Delta nRT$  были вычислены стандартные энтальпии сгорания  $\Delta H_c^0$  и образования  $\Delta H_f^0$  соединений:

$$\text{DAzFNF: } \Delta H_c^0 = -6 895.4 \pm 5.7 \text{ кДж/моль,}$$

$$\Delta H_f^0 = 2 173.3 \pm 5.7 \text{ кДж/моль} = 4 197 \text{ кДж/кг;}$$

$$\text{DNFNF: } \Delta H_c^0 = -6 330.9 \pm 5.1 \text{ кДж/моль,}$$

$$\Delta H_f^0 = 1 608.7 \pm 5.1 \text{ кДж/моль} = 3 047 \text{ кДж/кг.}$$

При расчете стандартной энтальпии образования исследуемых соединений использовали стандартные значения этой величины известных соединений:  $\Delta H_f^0(\text{CO}_2(\text{г})) = -393.514$  кДж/моль;  $\Delta H_f^0(\text{H}_2\text{O}(\text{ж})) = -285.830$  кДж/моль [20].

Исходя из полученных значений  $\Delta H_f^0$  DAzFNF и DNFNF можно предварительно оценить чувствительность к удару этих соединений, сравнивая максимальные значения теплоты взрывного превращения  $Q_{\max}$  [21] — расчетной теплоты при превращении исследуемого вещества до азота, воды,  $\text{CO}_2$  и свободного углерода (последний образуется в случае недостатка кислорода для окисления всего водорода до воды и всего углерода до  $\text{CO}_2$ ). Для DAzFNF  $Q_{\max} = 6457$  кДж/кг, для DNFNF  $Q_{\max} = 6780$  кДж/кг. Для тротила и октогена  $Q_{\max} = 5876$  и  $6704$  кДж/кг соответственно. Таким образом, из сравнения значений максимальной теплоты взрывного превращения  $Q_{\max}$  следует, что DAzFNF несколько менее чувствителен, чем октоген, тогда как DNFNF немного более чувствителен. Следует отметить, что этот метод далеко не идеален, он применим только к молекулярным соединениям с  $\alpha < 1$ , но и при этих ограничениях наблюдаются существенные отклонения, поэтому к качественным результатам, полученным данным методом, следует относиться с осторожностью.

Данный вывод был подтвержден экспериментальными исследованиями чувствительности стандартными методами (к удару по русской пробе, т. е. количество взрывов (%) при падении груза массой 10 и 2 кг с высоты 25 см, и к трению по ГОСТ Р 50835-95). Чувствительность к удару грузом 10 кг с 25 см у DNFNF и DAzFNF составляет 100 %, тогда как их чувствительность к удару 2 кг с той же высоты равна 4 и 8 % соответственно. То есть оба соединения оказались несколько более чувствительны к удару, чем октоген, и находятся на одном уровне с CL-20. Некоторое завышение чувствительности к удару DNFNF и DAzFNF относительно октогена может быть связано, по-видимому, с особенностями морфологии кристаллов данных соединений, которая во многом определяет чувствительность большинства энергоемких веществ.

Несколько иная картина получена при исследовании чувствительности к трению. Независимо от природы заместителя — нитро- или

азидной группы, чувствительность к трению обоих соединений остается практически неизменной и равной: DNFNF —  $2400 \pm 200$  кг/см<sup>2</sup>, DAzFNF —  $2200 \pm 200$  кг/см<sup>2</sup>, т. е. оба компонента менее чувствительны к трению, чем октоген ( $1800 \pm 200$  кг/см<sup>2</sup>) и CL-20 ( $1100 \pm 200$  кг/см<sup>2</sup>).

При сопоставлении полученных значений  $\Delta H_f^0$  DAzFNF и DNFNF с ранее определенными для 3,4-бис(4-нитрофуразан-3-ил)фуразана и 4-азидо-4''-нитро[3,3':4',3'']терфуразана [9, 10] установлено, что энергетический инкремент замещения нитрогруппы на азидную группу в фуразановом цикле составляет в среднем 290 кДж/моль и близок к инкременту аналогичного замещения  $-\text{NO}_2$  на  $-\text{N}_3$  в тринитроэтане [22, 23].

## 2.2. Энергетические возможности DAzFNF и DNFNF в составе СТРТ

Было проведено исследование энергетических и баллистических характеристик рецептур СТРТ, аналогичных изученным в работе [10], т. е. анализировали композиции, содержащие смеси ПХА с DAzFNF или DNFNF при объемной доле активного связующего (АС;  $\text{C}_{18.96}\text{H}_{34.64}\text{N}_{19.16}\text{O}_{29.32}$ ;  $\Delta H_f^0 = -757$  кДж/кг;  $\rho = 1.49$  г/см<sup>3</sup>) [17], равной 19 %.

На рис. 4–6 приведены расчетные данные по энергетическим характеристикам ( $I_{sp}$ ,  $I_{ef}(2)$  и  $I_{ef}(3)$ ) составов с DAzFNF или DNFNF, а также для сравнения составов с

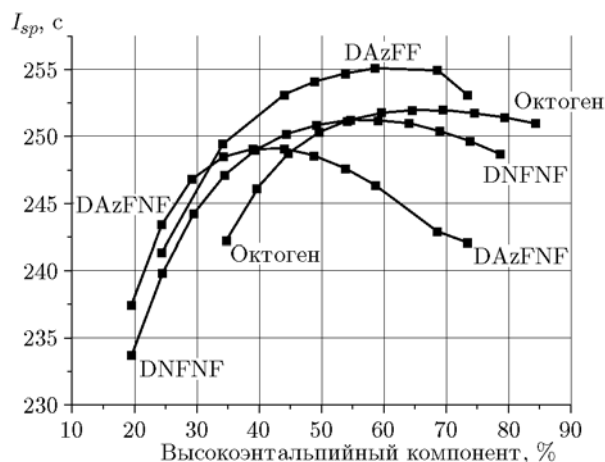


Рис. 4. Удельный импульс композиций 19 % (об.) АС + высокоэнтальпийный наполнитель + ПХА до 100 %

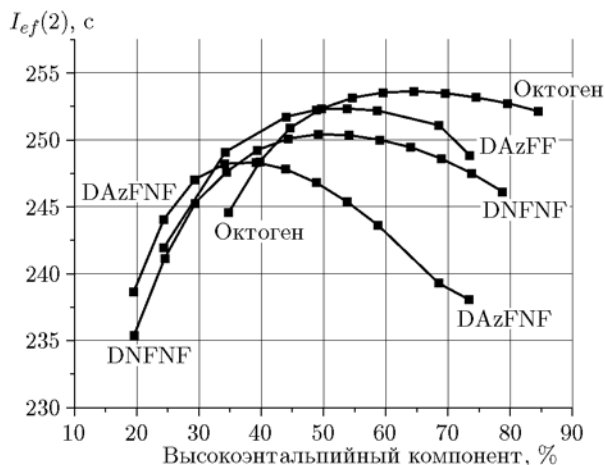


Рис. 5. Результаты расчета  $I_{ef}(2)$  композиций 19 % (об.) АС + высокоэнтальпийный наполнитель + ПХА до 100 %

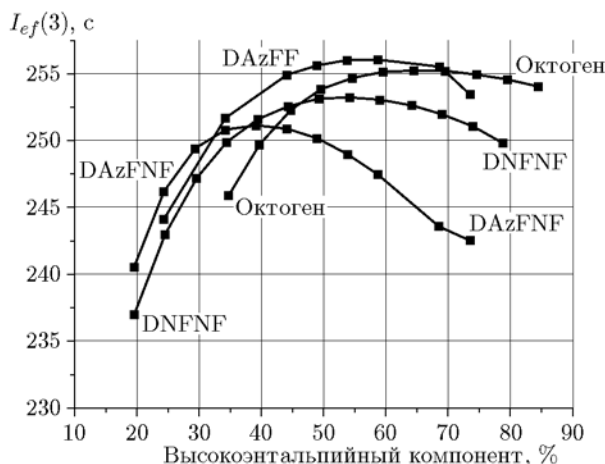


Рис. 6. Результаты расчета  $I_{ef}(3)$  композиций 19 % (об.) АС + высокоэнтальпийный наполнитель + ПХА до 100 %

DAzFF и октогеном. Качественно кривые  $I_{sp}$ ,  $I_{ef}(2)$  и  $I_{ef}(3)$  для каждого из изучаемых компонентов близки. Видно, что чем ниже значение  $\alpha$  высокоэнтальпийного компонента, тем при более низком содержании этого компонента наблюдается максимум удельных импульсов  $I_{sp}$ ,  $I_{ef}(2)$  и  $I_{ef}(3)$ . Составы с октогеном предпочтительнее составов с DAZFF только, судя по величине  $I_{ef}(2)$ , при дополнительных условиях, что содержание октогена выше 50 %. Поскольку присутствие органических взрывчатых веществ в рецептуре СТРТ создает определенную опасность, например повышается вероятность перехода горения в детонацию, и эта опасность тем больше, чем выше доля взрыв-

чатого вещества в рецептуре, то существуют определенные ограничения по содержанию таких веществ. Из данных, представленных на рис. 4–6, видно, что при содержании взрывчатого вещества не более 30 ÷ 35 % для составов с DAZFNF и DNFNF достигаются значения  $I_{ef}(3) = 248 \div 250$  с, что близко к составам с DAZFF и выше на  $\approx 4$  с, чем у составов с октогеном. Это может стать существенным преимуществом в применении DAZFNF и DNFNF в СТРТ вместо октогена.

Температура горения составов с DNFNF растет от 3360 до 3520 К при увеличении доли DNFNF от 40 до 78 %, в то время как у составов с DAZFNF она сначала повышается от 3110 до 3390 К с ростом содержания DAZFNF от 20 до 50 %, но при дальнейшем росте DAZFNF до 73 % падает до 3280 К (рис. 7). Тот факт, что при содержании DNFNF и DAZFNF выше 40 % температура горения составов с более высокоэнтальпийным DAZFNF ( $\Delta H_f^0 = 4197$  кДж/кг) ниже, чем составов с DNFNF ( $\Delta H_f^0 = 3047$  кДж/кг), объясняется тем, что DAZFNF характеризуется существенно меньшим значением  $\alpha$ , чем DNFNF (0.50 против 0.83), поэтому при содержании высокоэнтальпийного компонента выше 40 % замена DNFNF в композиции тем же количеством DAZFNF приводит к существенному снижению  $\alpha$  всей композиции и, как следствие, к уменьшению тепловыделения и температуры в процессе горения, при этом начинает снижать-

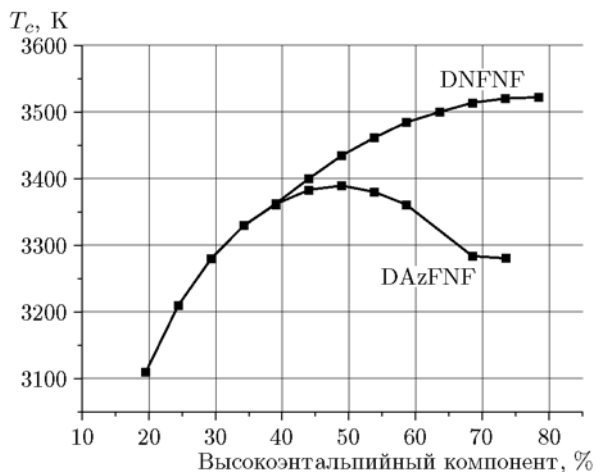


Рис. 7. Температура горения композиций 19 % (об.) АС + ПХА + DAZFNF или DNFNF в зависимости от содержания DAZFNF или DNFNF

ся и удельный импульс.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены теплота сгорания и энтальпия образования бис(4''-нитро[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-диазена (DNFNF) и (бис(4''-азидо-[3,3':4',3'']терфуразан-4-ил)-диазена (DAzFNF). Для DNFNF теплота сгорания равна  $6330.9 \pm 5.1$  кДж/моль, а энтальпия образования  $1608.7 \pm 5.1$  кДж/моль =  $3047$  кДж/кг, для DAzFNF — соответственно  $6895.4 \pm 5.7$  кДж/моль и  $2173.3 \pm 5.7$  кДж/моль =  $4197$  кДж/кг.

2. Согласно экспериментальным результатам по чувствительности к удару оба исследуемых соединения ненамного чувствительнее, чем октоген, и находятся на одном уровне с CL-20. Несколько иная картина получена для чувствительности к трению. Независимо от природы заместителя — нитро- или азидной группы, чувствительность к трению обоих соединений остается практически неизменной, и оба они менее чувствительны, чем октоген и CL-20.

3. Показано, что, несмотря на низкое содержание кислорода в DNFNF и DAzFNF, эти компоненты могут быть успешно использованы в рецептурах твердого ракетного топлива, не содержащего металла, в качестве добавки к перхлорату аммония. При низком содержании органического взрывчатого вещества в композиции соединения DNFNF и DAzFNF оказываются более эффективными, чем октоген.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шереметев А. Б. Нитро- и нитраминофуразаны // Рос. хим. журн. — 1997. — Т. XLI, № 2. — С. 43–54.
2. Махова Н. Н., Годовикова Т. И. Амино- и нитрофуроксаны: синтез и реакционная способность // Рос. хим. журн. — 1997. — Т. XLI, № 2. — С. 54–72.
3. Шарнин Г. П., Фаляхов И. Ф., Юсупова Л. М., Ларионова О. А. Химия энергоемких соединений. Кн. 2: N-, O-нитросоединения, фуроксаны, фуразаны, азиды, диазосоединения: учеб. пособие. — Казань: КНИТУ, 2011.
4. Stepanov A. I., Dashko D. V., Astrat'ev A. A. 3,4-Bis(4'-nitrofurazan-3'-yl)-furoxan: a melt cast powerful explosive and a valuable building block in 1,2,5-oxadiazole chemistry // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2012. — V. 9, N 4. — P. 329–342.
5. Ферштат Л. Л., Махова Н. Н. Новые подходы к синтезу неаннелированных полиядерных гетероциклических систем, включающих 1,2,5-оксадиазольный цикл // Успехи химии. — 2016. — Т. 85, № 10. — С. 1097–1145.
6. Астрат'ев А. А., Степанов А. И., Дашко Д. В., Санников В. С. Успехи в химии производных трис[1,2,5]оксадиазола (обзор) // Изв. Санкт-Петербург. гос. технолог. ин-та (техн. ун-та). — 2013. — № 21. — С. 4–14.
7. Fershtat L. L., Ovchinnikov I. V., Epishina M. A., Romanova A. A., Muravyev N. V., Lempert D. B., Makhova N. N. Assembly of nitrofurazan and nitrofuoroan frameworks for of high-performance energetic materials // ChemPlusChem. — 2017. — V. 82, N 11. — P. 1315–1319.
8. Лемперт Д. Б., Шереметев А. Б. Энергетические возможности нитропроизводных азо- и азоксифуразанов как компонентов смесевых ракетных топлив // Химия гетероцикл. соединений. — 2016. — Т. 52, № 12. — С. 1070–1077.
9. Казаков А. И., Дашко Д. В., Набатова А. В., Степанов А. И., Лемперт Д. Б. Термохимические и энергетические характеристики DNTF и DNFF // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 27–38.
10. Лемперт Д. Б., Казаков А. И., Санников В. С., Набатова А. В., Дашко Д. В., Степанов А. И. Термохимические и энергетические характеристики DAzFF и AzNTF // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 2. — С. 29–37.
11. Степанов А. И., Санников В. С., Дашко Д. В., Росляков А. Г., Астрат'ев А. А., Алиев З. Г., Гончаров Т. К., Алдошин С. М. Новое энергоемкое соединение — бис(4''-нитро-[3,3':4',3'']трифуразан-4-ил)диазен // Изв. АН. Сер. хим. — 2016. — № 8. — С. 2063–2067.
12. Астрат'ев А. А., Степанов А. И., Санников В. С., Дашко Д. В. Синтез и некоторые химические свойства 4''-нитро-3,3:4,3''-тер-1,2,5-оксадиазол-4-амин // Журн. орган. химии. — 2016. — Т. 52, № 8. — С. 1201–1209.
13. Иноземцев Я. О., Воробьев А. Б., Иноземцев А. В., Матюшин Ю. Н. Калориметрия энергоемких соединений // Горение и взрыв. — 2014. — Т. 7, № 7. — С. 260–270.
14. Kirpichev E. P., Zyuzin I. N., Avdonin V. V., Rubtsov Yu. I., Lempert D. B. The standard enthalpies of formation of alkoxy-NNO-azoxy compounds // Russ. J. Phys. Chem. — 2006. — V. 80, N 9. — P. 1359–1362.
15. Experimental Thermochemistry. V. I / F. D. Rossini (Ed.). — New York, 1956.
16. Алдошин С. М., Лемперт Д. Б., Гончаров Т. К., Казаков А. И., Согласнова С. И., Дорофеенко Е. М., Плишкин Н. А. Энергетические возможности смесевых твердых ра-

- кетных топлив на основе бимолекулярных кристаллов, содержащих CL-20 // Изв. АН. Сер. хим. — 2016. — № 8. — С. 2018–2024.
17. **Lempert D. B., Nechiporenko G. N., Manelis G. B.** Energetic characteristics of solid composite propellants and ways of energy increasing // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2006. — V. 3, N 4. — P. 73–87.
  18. **Трусов Б. Г.** Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий // Сб. тез. докл. XIV междунар. конф. по химической термодинамике. — СПб.: НИИ химии СПбГУ, 2002. — С. 483.
  19. **Павловец Г. А., Цуцуран В. И.** Физико-химические свойства порохов и ракетных топлив. — М.: Изд-во Министерства обороны, 2009.
  20. **Термические** константы веществ / под ред. акад. В. П. Глушко. — М.: Изд-во АН СССР, 1965.
  21. **Пепекин В. И., Корсунский Б. Л., Денисаев А. А.** Возбуждение взрыва твердых взрывчатых веществ при механическом воздействии // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 101–105.
  22. **Matyushin Yu. N.** Energy of interaction NO<sub>2</sub>-groups in nitroderivatives methane and ethane // *Proc. 31st Int. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2000.* — P. 51.
  23. **Пепекин В. И., Матюшин Ю. Н., Хисамутдинов Г. Х., Словецкий В. И., Файнзильберг А. А.** Термохимические свойства  $\alpha$ -азидополинитроалканов и энергии диссоциации связи C—N<sub>3</sub> в органических азидах // *Хим. физика.* — 1993. — Т. 12, № 10. — С. 1399–1403.

*Поступила в редакцию 08.04.2019.*

*После доработки 14.06.2019.*

*Принята к публикации 28.08.2019.*