

УДК 577;541.124.7

ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРИНИТРОМЕТИЛ-1,3,5-ТРИАЗИНОВ

© 2024 г. Т. С. Конькова¹, Е. А. Мирошниченко¹, А. В. Шастин²,
М. Н. Махов¹, Ю. Н. Матюшин¹, Б. Л. Корсунский^{1,2,*}¹ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской академии наук, Москва, Россия² Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

* E-mail: taskon@mail.ru

Поступила в редакцию 27.07.2022;

после доработки 06.10.2022;

принята в печать 20.10.2022

Калориметрическим методом определены энтальпии сгорания и энтальпии образования трех тринитрометильных производных 1,3,5-триазина. Полученные данные могут быть полезны для расчетов энергетических возможностей родственных соединений методом замены функциональных групп. В качестве примера рассчитаны детонационные характеристики высокоэнергоемкого трис(тринитрометил)-1,3,5-триазина.

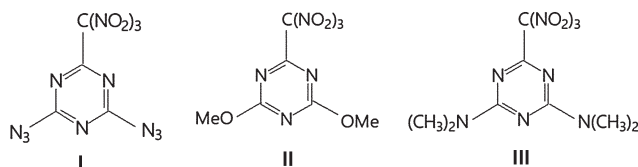
Ключевые слова: взрывчатые вещества, термохимические свойства, детонация, 1,3,5-триазин, нитросоединения.

DOI: 10.31857/S0207401X24010078 EDN: mheoik

ВВЕДЕНИЕ

Проблема создания новых эффективных энергоемких материалов продолжает оставаться актуальной. В этой связи тринитрометильная группа, содержащая большое количество кислорода, представляет значительный интерес как фрагмент молекул энергоемких соединений. Введение этой группы в молекулу энергоемкого вещества, эквивалентное введению в молекулу двух нитрогрупп (в том смысле, что одна из нитрогрупп тринитрометильной группы тратится на окисление атома углерода этой же группы), как правило, повышает его энтальпию образования и плотность. Среди веществ, содержащих тринитрометильную группу, специальный интерес представляют нитропроизводные 1,3,5-триазина, обладающие высокими энергетическими возможностями [1]. Подобно тринитрометильным производным азолов [2], они перспективны в качестве компонентов твердых ракетных топлив.

Целью настоящей работы было исследование термохимических свойств типичных тринитрометильных производных 1,3,5-триазина — 2,4-диазидо-6-тринитрометил-1,3,5-триазина (I), 2,4-диметокси-6-тринитро-метил-1,3,5-триазина (II) и 2,4-бис(диметиламино)-6-тринитрометил-1,3,5-триазина (III):



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения I и II получены по методикам, описанным в работах [3, 4]. Вещество III синтезировано из 2-диметиламино-4,6-бис(тринитрометил)-1,3,5-триазина и диметиламина по той же методике. Его строение подтверждено совокупностью физико-химических методов (ИК-, ЯМР-спектроскопия) и данными элементного анализа. Все синтезированные вещества, согласно данным элементного анализа имели чистоту не менее 99%.

Калориметрические измерения энергий сгорания выполнены на прецизионном автоматическом калориметре сжигания с изотермической оболочкой (конструкции лаборатории термодинамики высокоэнергетических систем ИХФ РАН), разработанном специально для сжигания энергоемких соединений. Основные характеристики конструкции использованного в работе калориметра приведены в работе [5], а методика измерений описана в работе [6]. Синтез и калориметрические измерения проводили до совпадения результатов в пределах погрешности эксперимента при использовании нескольких партий образцов. (подробнее см. в следующем разделе).

Скорость детонации и давление в точке Чепмена–Жуге оценивали по методу Камлета–Джейкобса [7]. Теплоту взрыва (ТВ) рассчитывали по методу, описанному в работе [8]. В качестве метательной способности (МС) рассматривалась скорость стальной пластины, измеряемая при испытаниях по методике М-40. Расчет осуществлялся способом, предложенным

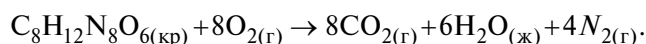
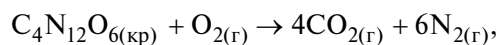
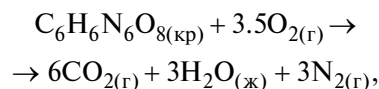
в работе [9]. При этом в качестве эталона использовали октоген (его МС принята равной единице).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты калориметрических измерений представлены в табл. 1–3. Экспериментальные термодимические данные для каждого соединения получали как средневзвешенные величины, найденные в результате независимых измерений 2–3 партий. Поскольку даже незначительное количество примесей может заметно исказить результаты эксперимента, опыты проводили с несколькими партиями образцов, синтезированными по различным методическим схемам. Для расчетов использовали средние значения энергий сгорания исследованных производных 1,3,5-триазинов. В табл. 1–3 приняты следующие обозначения: m_0 — масса образца (г), ΔT — подъем температуры в результате сжигания ($^{\circ}\text{C}$), Q — полное тепловыделение при сжигании (кал), q_i — энергия поджига (кал), q_N — поправка на образование азотной кислоты в калориметрической бомбе (кал), q_{cot} — энергия сгорания хлопчатобумажной нити (кал), q_a — энергия сгорания вспомогательного вещества — бензойной кислоты, марки К-3

(кал), $\Delta U'_B$ — энергия сгорания вещества в условиях бомбы (кал \cdot г $^{-1}$).

Реакции сгорания соединений I–III протекают согласно стехиометрии следующих уравнений:



С использованием этих уравнений и данных, приведенных в табл. 1–3, после введения поправки Уошберна [9] для перехода к стандартным условиям легко рассчитать стандартные энтальпии сгорания и образования исследованных соединений (соответственно ΔH_c° и ΔH_f° , ккал \cdot моль $^{-1}$). Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Экспериментальные термодимические данные, в свою очередь, могут быть использованы для оценки свойств взрывчатых и топливных составов на основе исследованных веществ. Они также могут быть применены к определению термодимических и взрывчатых характеристик родственных соединений. Для этого весьма полезным представляется описанный

Таблица 1. Энергии сгорания соединения I

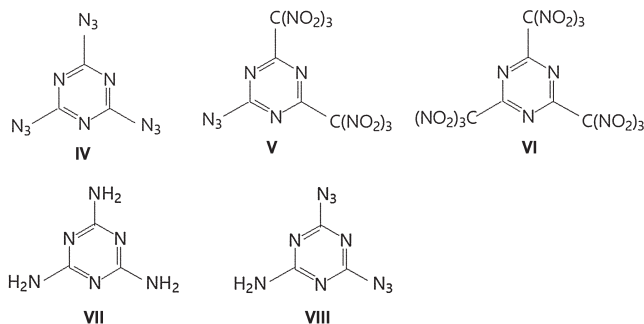
| m , г | ΔT , $^{\circ}\text{C}$ | Q , кал | q_i , кал | q_N , кал | q_{cot} , кал | q_a , кал | $-\Delta U'_B$, кал \cdot г $^{-1}$ |
|----------|---------------------------------|-----------|-------------|-------------|------------------------|-------------|--|
| Партия 1 | | | | | | | |
| 0.056168 | 1.91762 | 1027.90 | 0.52 | 1.73 | 8.48 | 913.67 | 1842.6 |
| 0.065920 | 1.97595 | 1059.17 | 0.52 | 2.00 | 6.35 | 928.67 | 1845.0 |
| 0.061732 | 1.98743 | 1065,32 | 0.52 | 1.93 | 6.74 | 942.13 | 1846.7 |
| 0.063383 | 1.96883 | 1055.35 | 0.52 | 1.97 | 6.50 | 929.52 | 1843.4 |
| 0.060972 | 1.97601 | 1059.19 | 0.52 | 1.90 | 6.76 | 937.75 | 1841.3 |
| | | | | | | | 1843.8 \pm 2.4 |
| Партия 2 | | | | | | | |
| 0.035467 | 1.87203 | 1003.46 | 0.52 | 1.66 | 6.61 | 929.30 | 1843.1 |
| 0.030467 | 1.64624 | 882.43 | 0.52 | 1.24 | 7.22 | 817.21 | 1845.8 |
| 0.037812 | 1.89327 | 1014.85 | 0.52 | 1.79 | 6.79 | 935.90 | 1847.2 |
| 0.038243 | 1.91303 | 1025.44 | 0.52 | 1.79 | 6.72 | 945.69 | 1849.2 |
| 0.031249 | 1.88771 | 1011.87 | 0.52 | 1.31 | 7.08 | 945.31 | 1844.9 |
| | | | | | | | 1846.0 \pm 1.0 |
| Партия 3 | | | | | | | |
| 0.053804 | 1.74205 | 933.79 | 0.52 | 1.59 | 5.36 | 827.00 | 1843.1 |
| 0.049893 | 1.97376 | 1057.99 | 0.52 | 1.45 | 6.21 | 957.67 | 1846.8 |
| 0.051763 | 2.06041 | 1104.44 | 0.52 | 1.52 | 6.45 | 1000.48 | 1844.4 |
| 0.047964 | 2.05571 | 1101.92 | 0.52 | 1.31 | 6.33 | 1005.38 | 1842.6 |
| 0.050942 | 2.06837 | 1108.71 | 0.52 | 1.52 | 6.54 | 1006.02 | 1847.3 |
| | | | | | | | 1845.4 \pm 2.2 |

Таблица 2. Энергии сгорания соединения II

| m , г | ΔT , °C | Q , кал | q_i , кал | q_N , кал | q_{cor} , кал | q_a , кал | $-\Delta U'_B$, кал·г ⁻¹ |
|----------|-----------------|-----------|-------------|-------------|-----------------|-------------|--------------------------------------|
| Партия 1 | | | | | | | |
| 0.048521 | 1.99447 | 1072.21 | 5.21 | 0.84 | 7.79 | 937.44 | 2496.0 |
| 0.044429 | 1.92060 | 1032.50 | 5.23 | 0.90 | 6.48 | 909.00 | 2495.9 |
| 0.068261 | 2.33179 | 1253.55 | 4.63 | 1.38 | 7.86 | 1069.35 | 2495.3 |
| 0.046701 | 1.07161 | 1058.92 | 4.93 | 0.97 | 7.39 | 929.13 | 2495.7 |
| 0.048967 | 2.00952 | 1080.30 | 4.70 | 0.90 | 7.13 | 945.44 | 2494.2 |
| | | | | | | | 2495.4 ± 0.8 |
| Партия 2 | | | | | | | |
| 0.081861 | 2.44633 | 1315.12 | 3.82 | 1.95 | 7.58 | 1097.44 | 2496.1 |
| 0.086781 | 2.43130 | 1307.04 | 3.82 | 1.73 | 8.12 | 1076.89 | 2498.7 |
| 0.084637 | 2.37036 | 1274.28 | 3.82 | 1.96 | 8.40 | 1049.02 | 2493.9 |
| | | | | | | | 2496.2 ± 4.4 |

в работе [10] метод замены функциональных групп. Он основан на том, что при замене одной функциональной группы на другую энтальпия образования изменяется практически на одну и ту же величину при одинаковой природе веществ (алифатические или ароматические), в которую эти группы входят. В сущности, метод замены функциональных групп является одним из вариантов аддитивных методов термодимических расчетов. В то же время, как отмечено в работе [11], этот метод позволяет получить более точные результаты по сравнению с другими аддитивными методами.

Проиллюстрируем сказанное с помощью расчетов термодимических свойств 1,3,5-триазинов, содержащих тринитрометильные и азидные заместители в различных соотношениях. Иными словами, объектами рассмотрения являются соединения **I**, **IV** — **VI** (все эти вещества — кристаллические):



Расчеты проведены с использованием термодимических данных по стандартным энтальпиям образования меламина (2,4,6-триамино-1,3,5-триазина (**VII**)) и 2,4-дiazидо-6-амино-1,3,5-триазина (**VIII**). Термодимические исследования меламина проводились неоднократно. Анализ литературы по-

казал, что измеренные значения стандартной энтальпии образования этого вещества варьируют в диапазоне (–16)– (–21) ккал·моль⁻¹. Поэтому в дальнейших расчетах используем усредненную величину: (–19 ккал·моль⁻¹). Стандартную энтальпию образования 2,4-дiazидо-6-амино-1,3,5-триазина принимаем равной 161.5 ккал·моль⁻¹ [12]. Из этих данных видно, что замена двух аминогрупп меламина на азидные группы сопровождается увеличением энтальпии образования на 180.5 ккал·моль⁻¹. Следовательно, замена одной аминогруппы меламина на азидную группу приводит к росту энтальпии образования на 90.2–90.3 ккал·моль⁻¹, и, следовательно, замена трех аминогрупп меламина на азидные группы, приводящая в конечном итоге к образованию циануртриазида (соединение **IV**), обуславливает повышение энтальпии образования на 270.8 ккал·моль⁻¹. В результате получаем значение стандартной энтальпии образования циануртриазида, равное 251.8 ккал·моль⁻¹. Эта величина прекрасно согласуется с экспериментально найденным значением 251.7 ккал·моль⁻¹ [12].

Зная энтальпию образования циануртриазида, легко найти соответствующую величину для соединения **V**. Действительно, из значения энтальпии образования циануртриазида, равного 251.7 ккал·моль⁻¹ и значения энтальпии образования 2,4-дiazидо-6-тринитрометил-1,3,5-триазина (соединение **I**), составляющего 193.1 ккал·моль⁻¹ (см. табл. 1), находим, что замена азидного заместителя на тринитрометильный фрагмент сопровождается уменьшением энтальпии образования на 58.6 ккал·моль⁻¹. Это и позволяет рассчитать энтальпию образования соединения **V**, равной 134.5 ккал·моль⁻¹.

Таблица 3. Энергии сгорания соединения III

| <i>m</i> , г | ΔT , °C | <i>Q</i> , кал | <i>q_i</i> , кал | | <i>q_{cor}</i> , кал | <i>q_a</i> , кал | $-\Delta U'_B$, кал·г ⁻¹ |
|--------------|-----------------|----------------|----------------------------|------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Партия 1 | | | | | | | |
| 0.068640 | 2.29342 | 1232.92 | 5.41 | 1.80 | 6.74 | 962.97 | 3729.6 |
| 0.079548 | 2.31439 | 1244.19 | 4.95 | 2.07 | 6.58 | 934.36 | 3724.3 |
| 0.075292 | 2.24428 | 1206.50 | 5.08 | 2.00 | 7.43 | 911.75 | 3722.0 |
| 0.078642 | 2.33068 | 1252.95 | 4.95 | 2.00 | 6.58 | 934.36 | 3724.3 |
| 0.077214 | 2.33549 | 1255.54 | 4.81 | 2.00 | 7.21 | 953.65 | 3728.2 |
| | | | | | | | 3726.0 ± 3.5 |
| Партия 2 | | | | | | | |
| 0.080594 | 2.38390 | 1281.56 | 3.82 | 2.82 | 7.09 | 967.13 | 3731.5 |
| 0.079117 | 2.35969 | 1268.55 | 3.82 | 2.82 | 6.89 | 959.96 | 3729.3 |
| 0.073581 | 2.31298 | 1243.43 | 3.82 | 2.59 | 7.71 | 955.03 | 3727.5 |
| 0.076698 | 2.26551 | 1217.92 | 3.82 | 2.61 | 6.96 | 918.66 | 3727.2 |
| 0.078657 | 2.33412 | 1254.80 | 3.82 | 2.69 | 7.37 | 947.63 | 3728.7 |
| | | | | | | | 3728.4 ± 2.5 |

Таблица 4. Термохимические свойства тринитрометильных производных 1,3,5-триазины

| Соединение | $-\Delta U'_B$, кал·г ⁻¹ | $-\Delta H'_c$, ккал·моль ⁻¹ | $\Delta H'_f$, ккал·моль ⁻¹ |
|--|--------------------------------------|--|---|
| I (C ₄ N ₁₂ O ₆) | 1843.8 ± 0.8 | 568.9 ± 0.7 | 192.7 ± 0.7 |
| | 1846.0 ± 1.0 | 569.6 ± 0.3 | 193.4 ± 0.3 |
| | 1845.4 ± 2.2 | 569.4 ± 0.6 | 193.2 ± 0.6 |
| | | | 193.1 ± 0.3 |
| II (C ₆ H ₆ N ₆ O ₈) | 249-5.4 ± 0.8 | 719.7 ± 0.2 | -49.6 ± 0.2 |
| | 2496.2 ± 4.4 | 719.9 ± 1.3 | -49.4 ± 1.3 |
| | | | -49.6 ± 0.2 |
| III (C ₈ H ₁₂ N ₈ O ₆) | 3726.0 ± 3.5 | 1173.6 ± 1.1 | 11.3 ± 1.1 |
| | 3728.4 ± 2.5 | 1174.3 ± 0.8 | 12.0 ± 0.8 |
| | | | 11.7 ± 0.6 |

Весьма интересным представителем тринитрометильных производных 1,3,5-триазины является трис(тринитрометил)-1,3,5-триазин (VI) [13], содержащий значительное количество азота и имеющий положительный кислородный баланс. Прямое экспериментальное определение энтальпии образования этого вещества затруднено в силу его невысокой гидролитической устойчивости.

Расчет проводится точно так же, как и для соединения V, поскольку трис(тринитрометил)-1,3,5-триазин формально получается из циануртриазида путем замены всех азидных групп на тринитрометильные. В результате расчета значение энтальпии образования соединения VI найдено равным 75.9 ккал·моль⁻¹.

Следует отметить, что энтальпию образования соединения VI пытались определить и раньше. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе [14]. Однако, авторы [14] в своих расчетах пользовались методом изодесмических реакций, который основан на весьма грубых предположениях и поэтому позволяет получить лишь ориентировочные результаты.

Определив энтальпию образования соединения VI, можно рассчитать некоторые его взрывчатые свойства. Плотность VI примем равной 1.91 г/см³ [1]. Полученные результаты приведены в табл. 5. Там же с целью сравнения представлены соответствующие данные для ряда хорошо известных взрывчатых веществ (ВВ) — гексанитрогексаазаизовюрцитана (CL-20), октогена, гексогена и тротила. Из этой таблицы видно, что детонационные свойства соединения VI близки к таковым для гексогена, и в этом смысле оно как индивидуальное ВВ большого интереса не представляет. В то же время следует иметь в виду, что, в отличие от подавляющего большинства мощных ВВ, оно имеет весьма значительный положительный кислородный баланс (+18.2%), а это означает, что на его основе можно получить весьма интересные взрывчатые составы типа окислитель-горючее.

На рис. 1 приведены результаты расчетов ТВ композиций октоген — соединение VI различного состава, а на рис. 2 — данные по МС тех же композиций, а также алюминизированного состава (содержание алюминия — 12.5% вес. %, размер частиц 7 мкм). Из полученных результатов видно, что кривые зависимостей проходят через максимальные значения, которые превышают величины ТВ и МС

Таблица 5. Взрывчатые свойства некоторых ВВ

| ВВ | КБ, % | ρ , г·см ⁻³ | D , км·с ⁻¹ | P_{CJ} , ГПа | Q , МДж·кг ⁻¹ | W |
|----------|-------|-----------------------------|--------------------------|----------------|----------------------------|-------|
| VI | +18.2 | 1.91 | 8.52 | 33.4 | 5.08 | 0.883 |
| CL-20 | -11.0 | 2.035 | 9.60 | 43.9 | 6.14 | 1.061 |
| Октоген | -21.6 | 1.904 | 9.15 | 38.3 | 5.70 | 1.000 |
| Гексоген | -21.6 | 1.806 | 8.82 | 34.6 | 5.67 | 0.960 |
| Тротил | -74.0 | 1.654 | 7.00 | 20.7 | 4.44 | 0.757 |

Примечания: КБ — кислородный баланс, ρ — плотность, D — скорость детонации, P_{CJ} — давление в точке Чепмена–Жуге, Q — теплота взрыва, W — относительная скорость пластины в условиях испытаний по методике М-40 (эталон — октоген).

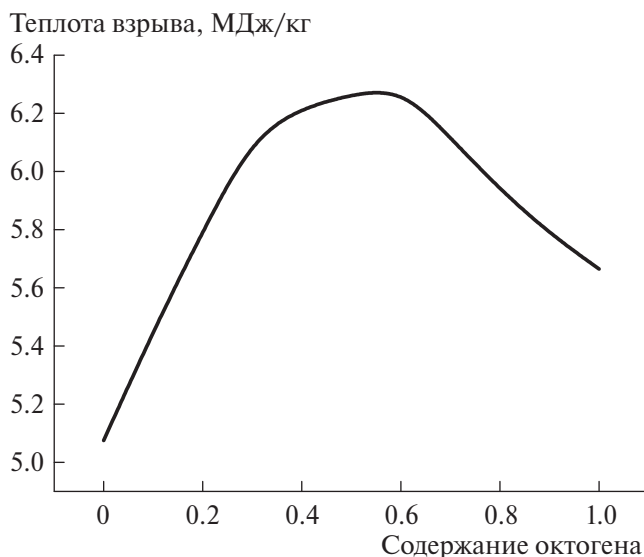


Рис. 1. Зависимость ТВ от содержания октогена в смеси с соединением VI.

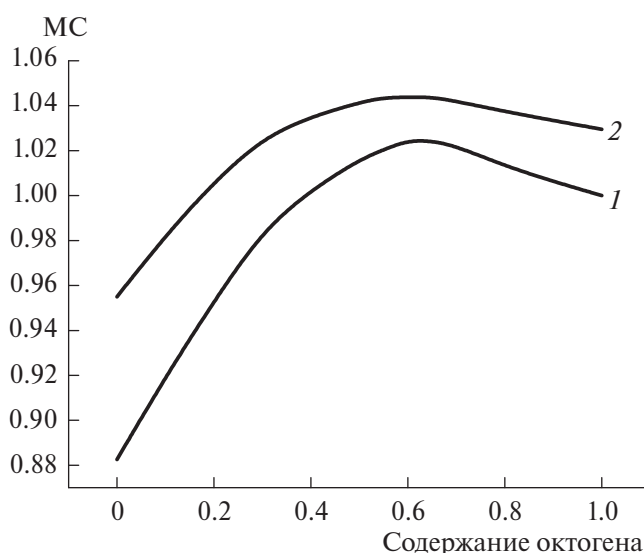


Рис. 2. Зависимость МС взрывчатых составов от содержания октогена. 1 — состав октоген — соединение VI, 2 — состав октоген — соединение VI — алюминий.

как самого соединения VI, так и октогена. Более того, максимальное значение ТВ бинарной смеси превосходит таковое для CL-20. Оптимальная по ТВ и МС концентрация октогена близка к 60%. Из рис. 2 также видно, что введение алюминия в бинарную композицию заметно повышает МС. В целом же можно сделать вывод, что максимальное значение МС алюминизированного состава октоген — соединение VI соответствует уровню таких мощных ВВ, как гексанитробензол и бис(дифтор-аминодинитроэтил)нитрамин.

Работа выполнена в рамках госзадания (темы №№ АААА-А21-121011990037-8, АААА-А19-119022690098-3, АААА-А19-119071190040-5, АААА-А18-118031490034-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шастин А.В., Годовикова Т.И., Корсунский Б.Л. // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 3. С. 311.
2. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 52.
3. Степанов Р.С., Круглякова Л.А., Астахов А.М. // ЖОХ. 2007. Т. 77. № 11. С. 1881.
4. Шастин А.В., Годовикова Т.И., Корсунский Б.Л. // Изв. РАН. Сер. хим. 2011. № 6. С. 1194.
5. Иноземцев Я.О., Воробьев А.Б., Иноземцев А.В., Матюшин Ю.Н. // Горение и взрыв. / Под ред. С.М. Фролова. Вып. 7. М.: Торус Пресс, 2014. С. 260.
6. Конькова Т.С., Матюшин Ю.Н., Мирошниченко Е.А., Воробьев А.Б. // Изв. РАН. Сер. хим. 2009. № 10. С. 1958.
7. Kamlet M.J., Jacobs S.J. // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. P. 23.
8. Махов М.Н., Архипов В.И. // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 3. С. 87.
9. Махов М.Н., Архипов В.И. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 8. С. 36.
10. Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф. Термохимия. Ч. II. М.: Изд-во МГУ, 1966.

11. Мирошниченко Е.А., Лебедев В.П., Матюшин Ю.Н. // ДАН. 2002. Т. 382. № 4. С. 497.
12. Huynh M.-H.V., Hiskey M.A., Hartline E.L., Montoya D.P., Gilardi R. // *Angew. Chem. Intern. Ed.* 2004. V. 43. P. 4924.
13. Shastin A.V., Godovikova T.I., Golova S.P., Kuz'min V.S., Khmel'nitskii L.I., Korsunskii B.L. // *Mendeleev Comm.* 1995. V. 5. № 1. P. 17.
14. Шастин А.В., Лемперт Д.Б. // *Хим. физика.* 2016. Т. 35. № 8. С. 44.

THERMOCHEMICAL PROPERTIES OF TRINITROMETHYL-1,3,5-TRIAZINES

T. S. Kon'kova¹, E. A. Miroshnichenko¹, A. V. Shastin²,
M. N. Makhov¹, Yu. N. Matyushin¹, B. L. Korsunskiy^{1,2}

¹ *Semenov Institute of Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Institute of problems of Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia*

The enthalpies of combustion and enthalpies of formation of three trinitromethyl derivatives of 1,3,5-triazine were determined by calorimetric method. The data obtained can be used for calculating the energy capabilities of related compounds by the method of replacing functional groups. As an example, the detonation characteristics of high-energy tris(trinitromethyl)-1,3,5-triazine are calculated.

Keywords: explosives, thermochemical properties, detonation, 1,3,5-triazine, nitrocompounds.

REFERENCES

1. A. V. Shastin, T. I. Godovikova, B. L. Korsunskiy. *Rus. Chem. Revs.*, 72(3), 279 (2003).
2. I. N. Zyuzin, I. Yu. Gudkova, D. B. Lempert. *Rus. J. Phys. Chem. B*, 14(5), 804 (2020).
3. R. S. Stepanov, L. A. Kruglyakova, A. M. Astakhov, *Zhurnal Obshchey Khimii*, 77(11), 1881 (2007) [in Russian].
4. A. V. Shastin, T. I. Godovikova, B. L. Korsunskiy, *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Khimicheskaya*, No. 6, 1194 (2011) [in Russian].
5. Ya. O. Inozemtsev, A. B. Vorobyev, A. V. Inozemtsev, Yu. N. Matyushin. *Goreniye I Vzryv*, No. 7, 260 (2014) [in Russian].
6. T. S. Kon'kova, Yu. N. Matyushin, E. A. Miroshnichenko, A. B. Vorobyev, *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Khimicheskaya*, No. 10, 1958 (2009) [in Russian].
7. M. J. Kamlet, S. J. Jacobs // *J. Chem. Phys.*, 48 (3), 23 (1968).
8. M. N. Makhov, V. I. Arkhipov, *Fiz. Goreniya Vzryva* 25 (3), 87 (1989) [in Russian].
9. M. N. Makhov and V. I. Arkhipov, *Russ. J. Phys. Chem. B* 2, 602 (2008).
10. S. M. Skuratov, V. P. Kolesov, A. F. Vorob'ev. *Thermochemistry (Part II)*, Moscow University, 1966.
11. E. A. Miroshnichenko, V. P. Lebedev, Yu. N. Matyushin, *Doklady Akademii Nauk*, 382(4), 497 (2002) [in Russian].
12. M.-H. V. Huynh, M. A. Hiskey, E. L. Hartline, D. P. Montoya, R. Gilardi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 43, 4924 (2004).
13. A. V. Shastin, T. I. Godovikova, S. P. Golova, V. S. Kuz'min, L. I. Khmel'nitskii, B. L. Korsunskii, *Mendeleev Comm.*, 5(1), 17 (1995).
14. A. V. Shastin, D. B. Lempert, *Khimicheskaya fizika*, 35(8), 44 (2016) [in Russian].