

УДК 662.215.12;662.216.4;662.414.6

ВЗРЫВЧАТЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕТРАЗЕНА И МТХ-1

В. И. Колесов, К. О. Капранов, А. В. Ткачёва, И. А. Кулагин

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 125480 Москва
kolesov2116@mail.ru

Взрывчатое вещество тетразен (1-амино-1-(тетразол-5-ил-дiazенил)гуанидин моногидрат) с начала XX в. активно используется в иницирующих составах, но обладает низкой термической и гидролитической стабильностью. Для замены тетразена предлагается 2-(тетразол-5-ил-дiazенил)гуанидин (МТХ-1), являющийся его более термостойким производным. Однако решение о применимости того или иного взрывчатого вещества принимается, в первую очередь, по его взрывным свойствам, которые как для тетразена, так и для МТХ-1 изучены недостаточно. Цель настоящей работы — определение скорости детонации и теплоты взрыва МТХ-1 в сравнении с тетразеном и объяснение полученных результатов. Калориметрические измерения проводились в модифицированной стальной бомбе. Образцы МТХ-1 и тетразена (≈ 1 г) взрывались в среде гелия с целью определения теплоты взрыва и объема газов. Получены экспериментальные данные по критическому диаметру обоих веществ. Скорость детонации МТХ-1 и тетразена определялась электромагнитным методом.

Ключевые слова: 1-амино-1-(тетразол-5-ил-дiazенил)гуанидин моногидрат, тетразен, 2-(тетразол-5-ил-дiazенил)гуанидин, МТХ-1, теплота взрыва, скорость детонации, критический диаметр.

DOI 10.15372/FGV20210310

ВВЕДЕНИЕ

В целях обеспечения безопасности производства и применения взрывчатого вещества (ВВ) необходимо знать его термохимические характеристики — теплоту взрыва Q_V , объем газообразных продуктов V_0 .

Полиазотистые соединения в качестве энергетических материалов вызывают большой интерес. Многие представители этого класса являются высокоэнергетическими быстрогорящими ВВ. Несмотря на перспективность использования полиазотистых соединений, большинство данных по их взрывным характеристикам получено расчетно-теоретическим путем и нуждается в экспериментальной проверке.

Одним из широко применяемых полиазотистых ВВ является тетразен (1-амино-1-(тетразол-5-ил-дiazенил)гуанидин моногидрат), уже около 100 лет активно используемый в иницирующих составах. Его свойства приведены во многих справочниках по ВВ, за исключением скорости детонации. Практически доступна единственная подробная работа о его взрывных характеристиках [1]. В ней сообщается,

что процесс детонации проходит полностью, твердые продукты взрыва (42 % от массы исходного) содержат производные цианмида, теплота взрыва близка к расчетной, но количество газообразных продуктов детонации существенно ниже теоретического, так как в газы превращается 58 % вещества. Скорость детонации в работе [1] не определялась. Единственная найденная нами информация по скорости детонации тетразена — это приведенные в [2] данные из малодоступной работы японского ученого Мацушита, подробнее об этом будет сообщено ниже.

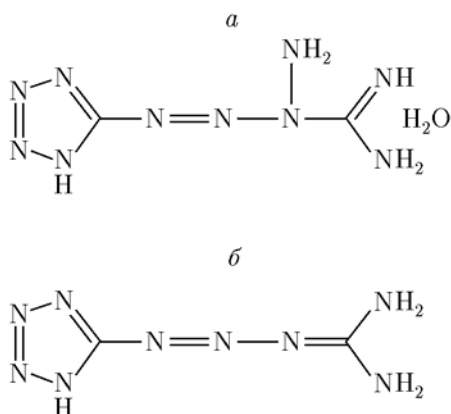
Что же касается предлагаемого термостойкого аналога тетразена 2-(тетразол-5-ил-дiazенил)гуанидина (МТХ-1), формула которого в сравнении с тетразеном приведена на рисунке, то для него в [3] указаны некоторые взрывные свойства, но скорость детонации неизвестна. Основные свойства тетразена и МТХ-1 представлены в табл. 1.

В разных источниках содержатся достаточно противоречивые данные о стандартной энтальпии образования $\Delta_f H^0$ и теплоте взрыва Q_V тетразена, скорость детонации для него и МТХ-1 неизвестна. Поэтому цель настоящей работы — получение энергетических и детонационных характеристик тетразена и МТХ-1,

Таблица 1

Основные свойства тетразена и МТХ-1

Иницирующее ВВ	ρ , г/см ³	$\Delta_f H^0$, кДж/моль	T_{ign} , °С	Q_V , кДж/кг	Чувствительность к механическому воздействию [3]	
					удар, мДж	трение, Н
Тетразен [4]	1.635	189.12	160	2302	21	10.9
МТХ-1 [3]	1.64	382.6	215	2254	16	7.85



Структурные формулы тетразена (а) и МТХ-1 (б)

поиск и интерпретация их взаимосвязи.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1. Получение веществ

В опытах использовался тетразен, полученный по известной методике [5]. Из этого тетразена по методике [6] получен МТХ-1. Качественно МТХ-1 идентифицировали сравнением инфракрасных (ИК) спектров с литературными [3]. Также близки к литературным и характерные температуры при термическом анализе [7].

1.2. Калориметрические измерения

Калориметрические измерения проводились в стандартном калориметре В-08М, оборудованном модифицированной бомбой объемом 210.5 мл, способной выдержать взрыв 2 г мощного ВВ. Рост температуры измерялся термометром Testo 735 с точностью 10^{-3} К. Калориметр откалиброван с помощью

термохимического стандарта бензойной кислоты с известной внутренней энергией сгорания $\Delta U_c = -26\,454.01$ Дж/г [8, 9]. Тепловой эквивалент калориметра равен 14 690 Дж/К. МТХ-1 и тетразен взрывали в толстой медной оболочке в среде гелия при массе зарядов $1 \div 1.5$ г и плотностях $\rho = 0.34 \div 0.86$ г/см³. Инициирование проводили 30-микронной нихромовой нитью с $50 \div 60$ мг азиды свинца на ней.

Конденсированные продукты детонации собирали с внутренней поверхности бомбы и осколков оболочки.

1.3. Определение критического диаметра

Критический диаметр определяли методом оценки полноты детонации цилиндрических зарядов разного диаметра в оболочках из полиэтилена и бумаги. Ввиду малой бризантности заряды взрывались на деревянной пластине-свидетеле, по характеру ее разрушения, а также по остаткам оболочки и вещества определяли, прошла ли детонация до конца заряда.

1.4. Определение скорости детонации

Детонационные исследования проводили электромагнитным методом. Заряд ВВ с расположенным внутри него тонким металлическим датчиком помещается в постоянное магнитное поле. При прохождении детонационной волны по заряду датчик вовлекается в движение продуктами взрыва. В нем возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая фиксируется осциллографом. Разность времен между сигналами от двух и более датчиков на известном расстоянии использовалась для определения скорости детонации.

В данных экспериментах алюминиевый П-образный датчик толщиной 0.12 мм имел горизонтальную площадку длиной 5 мм и распо-

Таблица 2

Энтальпия образования, теплота взрыва и объем газов при взрыве тетразена и МТХ-1

Иницирующее ВВ	$\Delta_f H^0$, кДж/моль	Q_V , кДж/кг			V_0 , л/кг		
		эксперимент	расчет	литература	эксперимент	расчет	литература
Тетразен	156 ± 26	2490 ± 50	2870	2423 [1] 2755 [3] 2300 [12]	454 ± 11	906	505 [1] 420 [12]
МТХ-1	314 ± 24	2050 ± 20	2316	2254 [3]	477 ± 34	901	—

лагался на оси заряда внизу. Выше на расстоянии $1 \div 2$ диаметров заряда помещался рвущийся датчик, изготовленный из алюминиевой фольги шириной 2.5 мм и толщиной 20 мкм. Использовались заряды диаметром 10 и 16 мм. Высота заряда ВВ над рвущимся датчиком составляла $3 \div 4$ диаметра для формирования нормальной детонационной волны малой кривизны. Инициатор детонации — $50 \div 60$ мг азид свинца на 30-микронной нихромовой нити. В опытах с прессованными цилиндрическими шашками использовалось по три шашки высотой, равной диаметру: одна — между П-образным и рвущимся датчиком, две другие — над каждым рвущимся. В этих опытах применялись дополнительные детонаторы из гексогена и бензотрифуроксана.

Для создания постоянного однородного магнитного поля использовался электромагнит с диаметром полюсов 80 мм и зазором между ними 75 мм. Обмотка электромагнита защищена от действия взрыва титановой трубой, а с торцов — титановыми дисками толщиной 5 мм. Электромагнит питается постоянным током от генератора ПН-176. При токе 24 А магнитная индукция равна 0.185 Тл, контроль осуществлялся прибором ИМИ-1.

Датчики подсоединялись параллельно и по коаксиальному кабелю с компенсирующим сопротивлением соединялись с цифровым осциллографом АКИП 4110.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Синтез и идентификация МТХ-1 и тетразена

Синтез полученных соединений проводили по известным из литературы методикам. Идентификацию выполняли по ИК-спектрам и характерным температурам термического анализа.

2.2. Энтальпия образования и теплота взрыва МТХ-1 и тетразена

В табл. 2 сведены значения $\Delta_f H^0$, Q_V и V_0 для тетразена и МТХ-1, известные из литературы и полученные нами в экспериментах и термодинамических расчетах. Термодинамические расчеты проводились с использованием программ SD [10] и REAL [11], моделирующих детонацию и горение соответственно.

В расчетах применялись значения $\Delta_f H^0$ из данной работы и реальные значения плотности зарядов в пределах $\rho = 0.54 \div 0.91$ г/см³.

Сравнение экспериментальных и расчетных величин Q_V показывает, что при моделировании детонации теплота взрыва оказывается немного выше экспериментальной, но объем газообразных продуктов превышает экспериментальный практически вдвое.

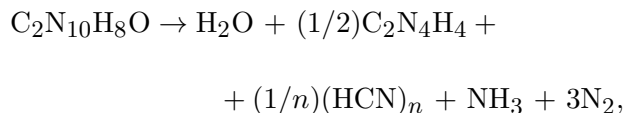
Это отличие объясняется тем, что взрывное разложение МТХ-1 и тетразена не происходит с образованием термодинамически равновесных продуктов (водород, аммиак, метан, углерод). Сначала образуются продукты распада гуанидиновых и тетразольных фрагментов (цианамид и синильная кислота соответственно), которые являются термодинамически неравновесными из-за эндотермичности, но кинетически стойкими в данных условиях. Эти продукты конденсируются в термостойкие поликонденсаты цианамида (дициандиаמיד, меламин, мелем) и полимеры синильной кислоты HCN. В работе [7] авторы предлагали возможные пути распада тетразена и МТХ-1 при медленном нагреве с образованием в конденсированной фазе диазиридинимина и продуктов конденсации цианамида. Вероятно, подобные процессы протекают и при взрыве.

В калориметрических взрывных экспериментах как с тетразеном, так и с МТХ-1 внутри бомбы образуются конденсированные продукты детонации в виде постепенно густеющей красной жидкости, превращающейся в твер-

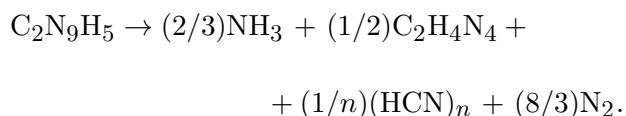
дый коричневый налет. О красной жидкости в бомбе сообщалось и в [6]. ИК-спектры выделенных конденсированных продуктов детонации тетразена оказались очень сходны со стандартными ИК-спектрами цианоганидина (димера цианамид), как и в работах [1, 7].

Наличие аммиака и синильной кислоты ощущается в продуктах взрыва по запаху и подтверждается анализом селективного сорбирования газовой фазы продуктов взрыва. Однако в газе концентрация HCN невелика. Основное ее количество, как мы полагаем, конденсируется, а затем полимеризуется вместе с цианамидом из жидкости в твердый налет. О полимеризации синильной кислоты, цвете и характере продуктов сообщается в работах [13–15].

Исходя из вышеприведенных соображений, а также из материального, теплового баланса и объема газов, мы предлагаем следующие уравнения реакции при взрыве тетразена и МТХ-1 с образованием димера цианамид и продукта полимеризации синильной кислоты (при условии $\Delta_f H^0 \approx 0$ для $(\text{HCN})_n$, что обосновано строением этого полимера [15]): тетразен:



МТХ-1:



При расчете по данным уравнениям получено $Q_V = 2418$ кДж/кг, $V_0 = 476$ л/кг для тетразена и $Q_V = 1975$ кДж/кг, $V_0 = 482$ л/кг для МТХ-1.

2.3. Определение критического диаметра детонации

При определении критического диаметра детонации по описанной выше методике установлено, что заряд тетразена диаметром $d = 1.9$ мм и заряд МТХ-1 диаметром $d = 2.2$ мм полностью детонировали с разрушением оболочки и пластины-свидетеля. Оболочки меньшего диаметра были повреждены, в части опытов наблюдались остатки вещества. По результатам экспериментов можно сделать вывод,

что критический диаметр детонации тетразена равен 1.9 мм, а критический диаметр МТХ-1 составляет 2.2 мм.

2.4. Определение скорости детонации

В данном исследовании использовались заряды как подпрессованные вручную, так и в виде прессованных цилиндрических шашек.

Оказалось, что прессованные шашки диаметром 10 мм и плотностью 1.41 ± 0.01 г/см³ для тетразена и 1.34 ± 0.01 г/см³ для МТХ-1 не способны детонировать от дополнительных зарядов гексогена и бензотрифуроксана. Причем были использованы как насыпные заряды плотностью $0.7 \div 0.8$ г/см³, так и прессованные плотностью 1.77 г/см³. Наблюдались остатки вещества в виде осколков шашек в случае как тетразена, так и МТХ-1.

Результаты опытов кажутся парадоксальными — инициирующие ВВ не способны к детонации! Но в [12] сообщалось о резком уменьшении бризантности тетразена с повышением плотности заряда, что ранее объяснялось многозначительным термином «перепрессовка».

Вероятно, при росте плотности перестает работать механизм инициирования детонации, свойственный пористым системам, и при данных условиях детонация становится невозможной. Такие явления характерны для слабых ВВ типа динитротолуола и смесевых ВВ типа аммонитов, но для инициирующих ВВ описаны, вероятно, впервые.

Заряды тетразена меньшей плотности устойчиво детонировали как от насыпного промежуточного детонатора из гексогена, так и от азидного детонатора массой $50 \div 60$ мг. В табл. 3 представлены результаты проведенных экспериментов с зарядами тетразена диаметром 10 мм. Оболочки зарядов были изготовлены из бумаги и органического стекла. Толщина оболочки составляла 1 мм. По результатам экспериментов можно судить, что в данном случае материал оболочки не оказывает значительного влияния на скорость детонации D тетразена. По мере роста плотности заряда скорость детонации увеличивается с выходом на практически постоянное значение при $\rho = 0.62$ г/см³. Разброс составил $D_{\text{эксп}} = 3120 \pm 190$ м/с для зарядов плотностью $0.62 \div 0.92$ г/см³. В единичном эксперименте с зарядом диаметром 16.4 мм и плотностью 1 г/см³ в оболочке из жесткой ПВХ-трубы со стенкой толщиной 2 мм

Таблица 3
Экспериментальные и расчетные скорости детонации зарядов тетразена диаметром 10 мм

ρ , г/см ³	Оболочка	$D_{\text{эксп}}$, м/с	$D_{\text{расч}}$, м/с	ΔD , м/с
0.55	Бумага	2099	3416	1317
0.60	Бумага	2265	3658	1393
0.62	Бумага	2921	3756	835
0.78	Бумага	3000	4549	1549
0.78	Оргстекло	3232	4549	1317
0.82	Оргстекло	2987	4748	1761
0.84	Бумага	3416	4848	1432
0.91	Оргстекло	3188	5193	2005
1.41 ± 0.01	Бумага	Отказ 2 опыта	7462	—

Таблица 4
Экспериментальные и расчетные скорости детонации зарядов МТХ-1 диаметром 10 мм

ρ , г/см ³	Оболочка	$D_{\text{эксп}}$, м/с	$D_{\text{расч}}$, м/с	ΔD , м/с
0.54	Оргстекло	2770	3148	378
0.55	Оргстекло	2739	3193	454
0.60	Оргстекло	2606	3425	819
0.62	Оргстекло	2766	3520	754
0.64	Бумага	2856	3617	761
0.64	Бумага	2926	3617	691
0.68	Бумага	2712	3815	1103
0.90	Бумага	2926	4936	2010
1.34 ± 0.01	Бумага	Отказ 2 опыта	6983	—

получена скорость $D_{\text{эксп}} = 3320$ м/с, т. е. увеличение диаметра не дает заметного роста скорости детонации. При сравнении измеренных и рассчитанных по программе SD [10] скоростей детонации видна существенная разница. Расчетные скорости на $800 \div 2000$ м/с больше экспериментальных, различие заметно растет с увеличением плотности и в среднем составляет $\Delta D = 1450$ м/с.

Для МТХ-1 определение скорости детонации проводилось в аналогичных условиях (табл. 4). При росте плотности от 0.54 до 0.9 г/см³ скорость детонации в экспериментах была практически постоянной — 2790 ± 110 м/с, тогда как расчетная увеличивалась с 3150 до 4936 м/с, т. е. $\Delta D = 380$ м/с при $\rho = 0.54$ г/см³, а при $\rho = 0.9$ г/см³ разница составляет $\Delta D = 2010$ м/с.

Чтобы установить зависимость скорости детонации МТХ-1 от диаметра заряда, были выполнены эксперименты, результаты которых приведены в табл. 5. Наблюдается практически постоянная скорость детонации при $d \geq 6$ мм, причем среднее значение $D_{\text{эксп}} = 2910 \pm 150$ м/с практически совпадает с данными табл. 4. Это подтверждает, что были достигнуты предельные диаметр и скорость детонации зарядов МТХ-1 и тетразена при данных плотностях. В [16] похожие зависимости скорости детонации при увеличении плотности и диаметра заряда характерны как для смесевых, так и для слабых индивидуальных ВВ.

Таблица 5
Экспериментальные скорости детонации зарядов МТХ-1 различного диаметра

d , мм	ρ , г/см ³	$D_{\text{эксп}}$, м/с
5.35	0.65	2583
5.35	0.85	2605
5.95	0.71	2789
5.95	0.87	2867
6.25	0.71	2744
6.25	0.94	2882
8.70	0.84	3062
8.70	0.94	3192
13.50	0.54	2727
13.50	0.87	2950
14.95	0.63	2861
14.95	0.92	3060

Напомним, что в [2] сообщается о попытках измерить скорость детонации тетразена на зарядах диаметром $1 \div 3$ мм в неизвестной оболочке, при этом для заряда плотностью 0.8 г/см³ получена скорость $D = 1500 \pm 140$ м/с, что в два раза меньше наших результатов. Такую большую разницу нельзя объяснить только близостью диаметра заряда к

критическому. Вероятно, в [2] имел место низкоскоростной режим детонации, для которого характерен резкий рост скорости детонации с увеличением диаметра заряда [16], что и произошло при переходе к диаметру 10 мм в наших экспериментах. Поэтому за «нормальную» скорость детонации в данных условиях, видимо, следует принять полученные нами значения. При этом экспериментальные скорости детонации значительно ниже рассчитанных по программе [10].

Согласно теории [16] к снижению скорости нормальной детонации ведет уменьшение теплового эффекта процесса. Как указывалось выше, калориметрическая теплота взрыва тетразена и МТХ-1 ненамного меньше расчетной. Меньшую теплоту детонации, ведущую к снижению ее скорости по сравнению с расчетом, можно объяснить, по нашему предположению, отличием условий эксперимента при детонации в калориметре и на электромагнитной установке.

Процесс детонации длится микросекунды. Измерение теплоты взрыва в калориметре — минуты. При взрыве тетразена и МТХ-1 образуются эндотермичные цианамид и синильная кислота [17], сначала в виде мономеров. В калориметрической бомбе эти мономеры полимеризуются с выделением дополнительного тепла, и в итоге измеряется не только теплота детонации, но и теплота последующих медленных вторичных процессов полимеризации. Поэтому калориметрическая теплота взрыва получается больше теплоты детонации, т. е. теплоты взрыва непосредственно во фронте детонационной волны.

Расчет теплоты детонации без учета теплоты полимеризации дает для тетразена значение $Q_V = 1850$ кДж/кг, а для МТХ-1 — $Q_V = 1410$ кДж/кг. Если воспользоваться приблизительным соотношением [16] $D_1/D_2 = \sqrt{Q_{V1}}/\sqrt{Q_{V2}}$, то для тетразена и МТХ-1 расчетное значение составляет $D_{\text{тетр}}/D_{\text{МТХ-1}} = \sqrt{1850}/\sqrt{1410} = 1.145$, а экспериментальное — $D_{\text{тетр}}/D_{\text{МТХ-1}} = 3120/2790 = 1.12$, т. е. отличается от расчетного всего на 2 % и косвенно подтверждает верность нашего предположения о продуктах детонации данных инициирующих ВВ. Очевидно также, что тетразен является несколько более сильным инициирующим ВВ, чем МТХ-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование детонационных характеристик тетразена и его термостойкого аналога — нового энергоемкого соединения МТХ-1. Тетразен превосходит МТХ-1 по теплоте взрыва (2490 и 2050 кДж/кг соответственно).

Определены критические диаметры детонации тетразена и МТХ-1 — 1.9 и 2.2 мм соответственно.

Впервые определены скорости детонации тетразена и МТХ-1 в широком диапазоне плотностей. По зависимости скорости детонации от плотности и диаметра заряда исследуемые вещества можно отнести к слабым взрывчатым веществам. Тетразен превосходит МТХ-1 по скорости детонации (3120 и 2790 м/с соответственно). Обнаружена невозможность детонации прессованных зарядов МТХ-1 и тетразена диаметром 10 мм, что нехарактерно для инициирующих взрывчатых веществ.

Объяснено большое различие теоретических и экспериментальных значений теплоты взрыва и скорости детонации МТХ-1 и тетразена. Причина заключается в образовании термодинамически неравновесных, кинетически стойких, эндотермических продуктов взрыва — цианамида и синильной кислоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dilun S.** Study on the explosion reaction equation of tetrazene // Proc. 17th Int. Pyrotechnics Seminar Combined with the 2nd Beijing Int. Symp. of Pyrotechnics and Explosives. — 1991.
2. **Юхансон К., Персон П.** Детонация взрывчатых веществ / под ред. В. К. Боболева. — М.: Мир, 1973.
3. **Fronabarger J. W., Williams M. D., Stern A. G., Parrish D. A.** МТХ-1 — a potential replacement for tetrazene in primers // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2016. — V. 13, N 1. — P. 33–52.
4. **Жуков Б. П.** Энергетические конденсированные системы: краткий энциклопедический словарь. — Изд. 2-е, испр. — М.: Янус-К, 2000.
5. **Багал Л. И.** Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. — М.: Машиностроение, 1975.
6. **Fronabarger J. W., Williams M. D.** Alternative to tetrazene: WO Patent 2012/003031 A2, 2012.

7. Yan Q. L., Zeman S., Zhang J. G., He P., Musila T., Bartoskova M. Multi-stage decomposition of 5-aminotetrazole derivatives: kinetics and reaction channels for the rate-limiting steps // Phys. Chem. Chem. Phys. — 2014. — V. 16, N 44. — P. 24282–24291.
8. GOST (State Standard) 147–95. Solid mineral fuel. Determination of the highest combustion heat and calculation of the lowest combustion heat. — Minsk: Izd. Standartov, 1995.
9. Иноземцев Я. О., Воробьев А. Б., Иноземцев А. В., Жильцов И. А., Кошманов Д. Е., Матюшин Ю. Н. Разработка государственного первичного эталона единицы энергии сгорания // Горение и взрыв. — 2011. — № 4. — С. 278–283.
10. Sumin A. I., Kondrikov B. N., Gamezo V. N., Raikova V. M. Shock and detonation general kinetics and thermodynamics in reactive systems computer package // Proc. 11th Int. Detonation Symp., Snowmass, Colorado USA, 1998. — ONR 333-00-5. — P. 30–35.
11. Belov G. B. Thermodynamic analysis of combustion products at high temperature and pressure // Propell., Explos., Pyrotech. — 1998. — V. 23. — P. 86–89.
12. Хмельницкий Л. И. Справочник по взрывчатым веществам. — М., 1962. — Ч. II.
13. Bonnet J. Y., Thissen R., Frisari M., Vuitton V., Quirico E., Orthous-Daunay F. R., Dutuit O., Roy L. L., Fray N., Cottin H., Horst S. M., Yelle R. V. Compositional and structural investigation of HCN polymer through high resolution mass spectrometry // Int. J. Mass Spectrom. — 2013. — V. 354. — P. 193–203.
14. Andersen J. L., Andersen T., Flamm C., Hanczyc M. M., Merkle D., Stadler P. F. Navigating the chemical space of HCN polymerization and hydrolysis: guiding graph grammars by mass spectrometry data // Entropy. — 2013. — V. 15, N 10. — P. 4066–4083.
15. He C., Lin G., Upton K. T., Imanaka H., Smith M. A. Structural investigation of HCN polymer isotopomers by solution — state multidimensional NMR // J. Phys. Chem. — 2012. — V. 116, N 19. — P. 4751–4759.
16. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960.
17. Манелис Г. Б., Назин Г. М., Рубцов Ю. И., Струнин В. А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. — М.: Наука, 1996.

*Поступила в редакцию 12.05.2020.
После доработки 07.08.2020.
Принята к публикации 24.08.2020.*
