

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 577 : 541.124

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ 2,4,6-ТРИС(2,2,2-ТРИНITРОЭТИЛНИТРАМИНО)-1,3,5-ТРИАЗИНА

© 2021 г. В. В. Захаров^{1*}, Н. В. Чуканов¹, Г. В. Шилов¹, Г. В. Малков¹, Т. С. Ларикова¹,
В. В. Неделько¹, А. Г. Корепин¹, Б. Л. Корсунский^{1,2}

¹Институт проблем химической физики Российской академии наук, Черноголовка, Россия

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vzakh@icp.ac.ru, chukanov@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 02.07.2020;

после доработки 30.09.2020;

принята в печать 20.10.2020

Термические превращения 2,4,6-трис(2,2,2-тринитроэтилнитрамино)-1,3,5-триазина (I) изучены в температурном интервале 22–300 °С с применением методов дифференциального термического анализа, порошковой рентгеновской дифрактометрии и ИК-спектроскопии. При 120 °С зафиксировано полиморфное превращение α -I $\rightarrow$ β -I, которому предшествует резкое возрастание объема элементарной ячейки и аморфизация I. Полиморфное превращение сопровождается значительным возрастанием скорости термического разложения соединения I. При нормальных условиях фаза β -I стабильна, но обратное полиморфное превращение с образованием дефектной фазы α -I может быть реализовано при давлении 5 кбар.

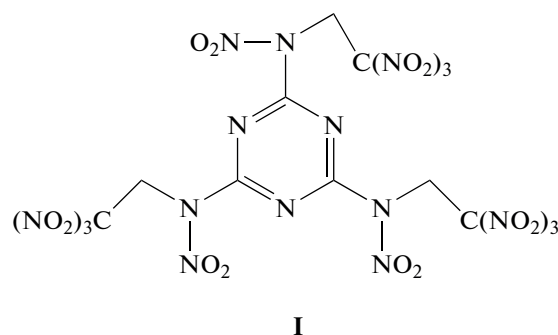
Ключевые слова: энергоёмкие вещества, 2,4,6-трис(2,2,2-тринитроэтилнитрамино)-1,3,5-триазин, термическое разложение, полиморфные превращения, дифференциальная сканирующая калориметрия, термогравиметрия, рентгеновская дифрактометрия.

DOI: 10.31857/S0207401X21070128

ВВЕДЕНИЕ

Нитропроизводные полиазотистых гетероциклических соединений являются потенциальными компонентами новых мощных энергоёмких композиций и прекурсорами углерод-нитридных материалов [1–7]. Одним из важнейших требований, предъявляемых к высокоэнергетическим соединениям при их практическом использовании, является требование стабильности. Последняя определяется как химическими факторами (кинетикой термического разложения и гидролиза, химической совместимостью с другими компонентами композиции), так и физическими (летучесть, растворимость в компонентах композиции, полиморфные превращения). Многие полиазотистые энергоёмкие соединения проявляют полиморфизм. Ранее нами была изучена кинетика полиморфных превращений 2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовюрцитана (CL-20) [8–13], 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетразоцина (октогена) [14], 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (FOX-7) [15], 2,4-бис(N,N-диметиламино)-6-тринитрометил-1,3,5-триазина [16], 2,4,6-трис(2,2,2-тринитроэтилнитрамино)-1,3,5-триазина (I) [17], а также исследовано влияние полиморфных превраще-

ний (ПП) на кинетику термического разложения этих соединений.



В работе [17] показано, что соединение I при нагреве до 122 °С претерпевает ПП α -I $\rightarrow$ β -I, которому предшествует резкое увеличение объема элементарной ячейки, сопровождающееся растормаживанием фрагментарной подвижности в кристалле α -I. При этом кинетические данные для твердофазного термического разложения β -I, а также α -I в узком температурном интервале ниже точки ПП соответствуют почти той же аррениусовской зависимости, что и для реакции разложения I в расплаве, т.е. тормозящий эффект кристаллической решетки незначителен. В настоящей работе

представлены новые данные о природе соединения β -I и влиянии ПП на термическую стабильность I.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика синтеза I описана в работе [18]. Первоначально термические превращения I изучены в работе [17] в неизотермическом режиме методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) с использованием синхронного термического анализатора NETZSCH STA 409C Luxx, сопряженного с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aeolos: диапазон температур 25–400 °С, продувка аргоном со скоростью 40 мл/мин, скорости нагрева от 1 до 10 К/мин и масса навесок 3.2–7.3 мг. Интегрирование эндо- и экзотермических пиков на кривых ДСК и, тем самым, определение величин тепловых эффектов проводилось с использованием программного обеспечения NETZSCH Proteus® для термического анализа, лицензированного и установленного на синхронном термическом анализаторе.

Для реакции термического разложения степень превращения определялась как по изменению массы конденсированного остатка, так и по тепловыделению. При использовании метода ДСК для определения кинетических параметров основное допущение заключается в предположении о пропорциональности тепловыделения ΔH степени конверсии α :

$$\alpha = \frac{\int_{t_0}^t (dH/dt) dt}{\int_{t_0}^{t_{tot}} (dH/dt) dt} = \frac{\Delta H}{\Delta H_{tot}}.$$

Более детальные эксперименты с использованием ДСК в режиме нагрева выполнены для образцов массой 2–4 мг в диапазоне температур от 25 до 150 °С со скоростью нагрева от 0.1 до 40 К/мин. В режиме термоциклирования эксперименты проводили для образцов массой 1–2.5 мг по следующей программе: нагрев от 25 до 120–123 °С со скоростью 10 К/мин, затем охлаждение до 25 °С со скоростью 20 К/мин и повторный нагрев до 170 °С со скоростью 10 К/мин. При проведении экспериментов использовали дифференциальный сканирующий калориметр DSC 821e (Mettler Toledo), стандартные алюминиевые тигли емкостью 40 мкл (Mettler Toledo, кат. № 00027331), частота фиксации данных — 1 Гц, скорость продувки азотом — 20 мл/мин. Первичную обработку термограмм проводили с помощью программного обеспечения STAR 9.10 (Mettler Toledo).

Образец β -I, использованный для исследований методами порошковой рентгеновской ди-

фрактометрии и ИК-спектроскопии, получен в результате ПП после выдержки его при 120 °С в течение 1 ч. Глубина разложения, сопровождавшего ПП, определена с использованием автоматических электронных термовесов АТВ-14М [19].

Исследования поликристаллических образцов методом порошковой рентгеновской дифрактометрии выполнены с использованием порошкового дифрактометра ARL X'TRA фирмы "Thermo Fisher Scientific" (геометрия съемки — 2θ , $\text{Cu}(K_\alpha)$ -излучение, твердотельный детектор, шаг сканирования — 0.02°, время измерения в точке — 1 с).

ИК-спектры соединения I и твердого продукта его термического разложения получены помощью инфракрасного фурье-спектрометра ALPNA (Bruker Optics). ИК-спектры поглощения образцов, запрессованных под давлением около 5 кбар в таблетки с KBr в качестве трансмиссионной и иммерсионной среды, регистрировали с разрешающей способностью 4 см⁻¹ и количеством сканирований 16.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе наших исследований [17] термические превращения соединения I в неизотермических условиях были изучены в диапазоне температур 30–400 °С методами ДСК и ТГ при различных скоростях линейного нагрева и ТГ при скорости нагрева 5 К/мин. На кривых ДСК обнаружены два эндотермических пика, один из которых был вызван твердофазным превращением $\alpha \rightarrow \beta$, а второй — связан с плавлением вещества. Были определены значения теплоты твердофазного превращения, теплот плавления и термического разложения I. Методом рентгенофазового анализа (РФА) показано, что полиморфному переходу предшествует резкое увеличение объема элементарной ячейки и растормаживание фрагментарной подвижности в молекуле I.

В настоящей работе изучены кинетика и механизм термических превращений I при различных температурах и влияние этих процессов на термическую стабильность I. На рис. 1 представлены кривые ДСК, полученные при нагреве I со скоростью от 0.1 до 40 К/мин. Как видно из этого рисунка, при скорости нагрева 0.1 К/мин не наблюдается эндотермических пиков, а при увеличении скорости нагрева появляются два эндотермических пика, которые с дальнейшим ее ростом меняют свое положение, форму и интенсивность. Ранее [17] было показано, что первый эндотермический пик вызван твердофазным ПП, а второй связан с плавлением вещества.

Значения эффективных температурных коэффициентов совокупностей процессов, приводящих к наблюдаемым фазовым переходам, оценены

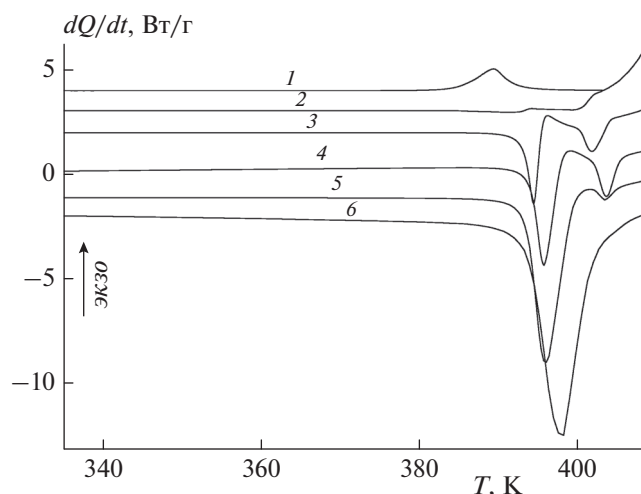


Рис. 1. Кривые ДСК, полученные при различных скоростях нагрева v (К/мин): 0.1 (1), 1 (2), 5 (3), 10 (4), 20 (5) и 40 (6). Кривые смещены вдоль оси ординат для наглядности.

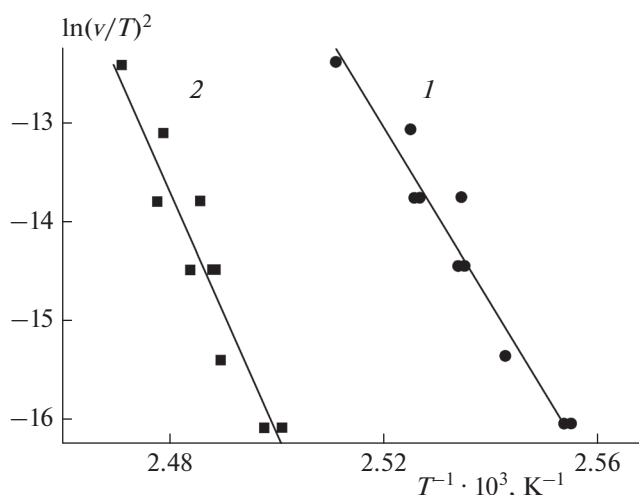


Рис. 2. Зависимости температур пиков ПП (1) и плавления (2) от скорости нагрева в полулогарифмических координатах уравнения КАС.

методом Киссинджера—Акахира—Суносе (КАС) [20] с использованием значений температур, при которых наблюдаются максимумы скорости тепловыделения (T_{peak}) при различных скоростях нагрева v образцов (рис. 2). Эти величины составляют (1020 ± 120) кДж/моль ($r = 0.943$) для плавления и (740 ± 70) кДж/моль ($r = 0.964$) для твердофазного ПП. Очевидно, столь высокие значения надо рассматривать как формальные величины, которые характеризуют процессы теплопереноса, а не кинетику фазовых превращений.

Несмотря на то, что кривые зависимостей температур экстремумов эндотермических пиков ПП (1) и плавления (2) от скорости нагрева удовлетворительно спрямляются в полулогарифмических координатах, соответствующих уравнению, полученному методом КАС, при анализе данных, приведенных на рис. 1, заметно, что при скоростях нагрева $v = 1\text{--}20$ К/мин после ПП происходит экзотермический “скачок”, плавно переходящий в эндотермический пик плавления. Такая форма кривых ДСК является следствием наложения нескольких процессов — эндотермических (ПП и плавления) и экзотермического (начальная фаза термохимической деструкции). Важно отметить, что экзотермический процесс, связанный с термическим разложением, наблюдается только после завершения ПП. Очевидно, это происходит вследствие резкого уменьшения тормозящего эффекта кристаллической решетки из-за снижения плотности и увеличения свободного объема в результате ПП $\alpha\text{-I} \rightarrow \beta\text{-I}$ [17].

Доказательством того, что наблюдается суперпозиция нескольких процессов, является вид кривых зависимостей коэффициентов асимметричности пиков ПП и плавления (соотношения

площадей левой S_{left} и правой S_{right} частей каждого из пиков фазовых переходов относительно его экстремума) от скорости нагрева v , приведенные на рис. 3. Асимметричность обоих пиков значительно зависит от скорости нагрева, причем для ПП изменение асимметричности пика происходит скачком при скорости нагрева 10 К/мин. Этот факт может свидетельствовать о критическом явлении — изменении механизма ПП при варьировании скорости нагрева. С подобным явлением мы сталкивались ранее при изучении кинетики ПП в 2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовюрцитане [13]: в мелких кристаллах и при низких скоростях нагрева механические напряжения успевают релаксировать в процессе ПП, и процесс протекает в квазигомогенном режиме. В крупных кристаллах и при высоких скоростях нагрева механические напряжения, развивающиеся в результате ПП, не успевают релаксировать и запускается механостимулированный процесс ПП в волновом режиме. При повышении скорости нагрева экзотермический пик постепенно сдвигается в сторону больших температур — “сползает” с пика ПП и во все большей мере накладывается на пик процесса плавления, что приводит к снижению наблюдаемого общего теплового эффекта на эндотермической стадии.

Как видно из данных, приведенных на рис. 4, зафиксированное абсолютное значение эндотермического теплового эффекта ПП увеличивается по абсолютной величине от нуля до 64–68 Дж/г по мере увеличения скорости нагрева от 0.1 до 10–20 К/мин, а затем не меняется. Поэтому на основании данных рис. 3 и 4 можно с достаточной уверенностью говорить о том, что тепловой эффект ПП составляет около –66 Дж/г.

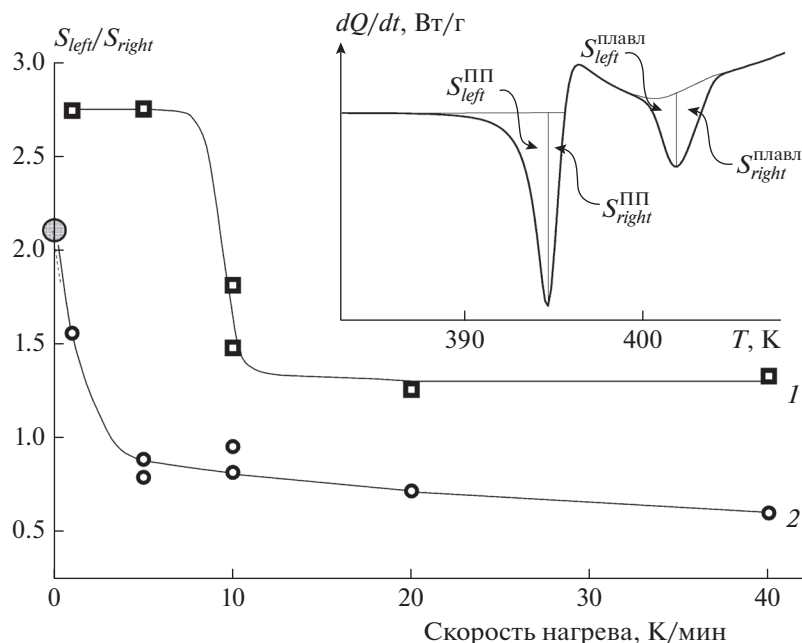


Рис. 3. Зависимости коэффициентов асимметрии (S_{left}/S_{right}) пиков ПП (1) и плавления (2) от скорости нагрева в ДСК-эксперименте. Крупным символом показан коэффициент асимметрии, найденный путем экстраполяции к нулевой скорости нагрева. На вставке — пример разделения пиков фазовых переходов на левую и правую части относительно экстремумов ($v = 5$ К/мин).

При скорости нагрева 0.1 К/мин эндотермический пик плавления не наблюдается (см. рис. 1). Определяемое путем экстраполяции к нулевой скорости нагрева низкое значение теплоты плавления (около -27 Дж/г, рис. 4) объясняется наложением параллельно протекающего процесса

термического разложения I, тепловой эффект которого составляет около 2800 Дж/г.

Если тепловой эффект ПП удалось определить методом ДСК из экспериментов с высокой скоростью нагрева, то для определения теплового эффекта плавления была выполнена дополнительная серия опытов: образец нагревался до температуры, близкой к температуре пика ПП ($122.6\text{--}122.7^\circ\text{C}$) со скоростью 10 К/мин (кривые 2–5 рис. 5), затем максимально быстро (со скоростью не менее 20 К/мин) охлаждался до температуры 25°C (термограммы не приведены) и/или сразу после этого нагревался со скоростью 10 К/мин до 170°C (кривые 2'–4' рис. 5), или выдерживался при 25°C в течение 48 ч, а затем нагревался (кривая 5' рис. 5).

Судя по всему, во время нагрева образца до температуры 123°C и последующего охлаждения процесс ПП $\alpha\text{-I} \rightarrow \beta\text{-I}$ полностью завершается, поэтому на повторной термограмме образца (кривая 4' рис. 5) присутствует только пик плавления, эндотермический эффект которого равен -56 Дж/г. Обратного ПП $\beta\text{-I} \rightarrow \alpha\text{-I}$ при охлаждении образца до комнатной температуры не зафиксировано. В то же время у образца, выдержанного при комнатной температуре в течение 48 ч после прогрева до 123°C (кривая 5' рис. 5), тепловой эффект плавления заметно (почти на 5%) меньше, чем у исходного образца, что может свидетельствовать о неполном ПП (например, сильной дефектности или присутствии аморфной фазы) во

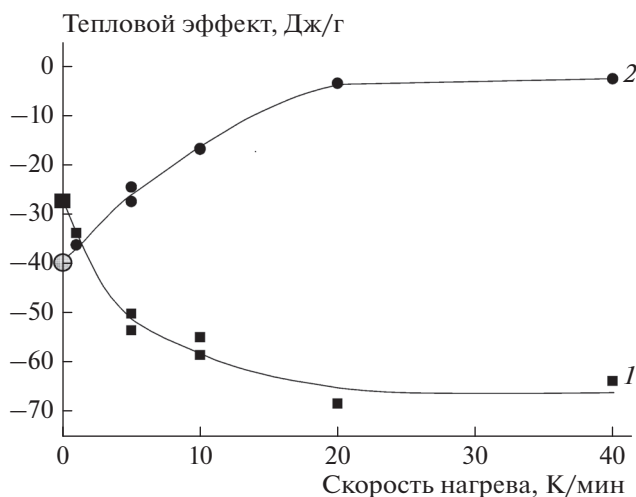


Рис. 4. Зависимости тепловых эффектов ПП (1) и плавления (2) от скорости нагрева в ДСК-эксперименте. Крупными символами показаны значения тепловых эффектов, найденные путем экстраполяции к нулевой скорости нагрева.

время выдержки при комнатной температуре. Косвенно в пользу этого предположения свидетельствуют данные РФА и ИК-спектроскопии (см. ниже).

Значение коэффициента асимметричности пика плавления, полученное при повторном нагреве в опыте (кривая 4' рис. 5), равно 2.2 и удовлетворительно ложится на кривую зависимости S_{left}/S_{right} от скорости нагрева v , экстраполированную к $v = 0$ (кривая 2 рис. 3). Значение теплового эффекта плавления, определенное в этом же опыте, равно -56 Дж/г, т.е. по абсолютной величине выше значения -40 Дж/г, найденного путем экстраполяции (рис. 4). Очевидно, как и в случае ПП, последняя величина занижена вследствие вклада теплового эффекта разложения **I** на небольшую глубину (около 0.57%), сопровождающего плавление.

После выдержки при 95 и 105°C сильно меняется характер кривых ДСК (рис. 6). В первом случае уменьшается площадь под пиками (значения наблюдаемых тепловых эффектов меняются от -58 и -17 до -42 и -14 Дж/г соответственно) и сдвигаются их экстремумы, что, скорее всего, связано с начальной стадией разложения, в результате чего возрастает дефектность кристаллов и появляется примесь конденсированных продуктов реакции. Присутствие последних приводит к снижению температуры, при которой появляется жидкая фаза. Выдержка соединения **I** при 105°C (т.е. выше точки начала ПП) в течение 1200 мин приводит к его полному разложению вследствие снятия тормозящего эффекта кристаллической решетки в результате ПП, как это было показано ранее [17].

ПП α -**I** $\rightarrow$ β -**I** происходит с разрушением монокристаллов. Поэтому рентгенографическое исследование β -полиморфа **I** выполнено по порошковому рентгенографическим данным. На рис. 7 приведены порошковые рентгеновские дифрактограммы двух полиморфных модификаций соединения **I**. Дифрактограмма β -**I** (кривая 3 на рис. 7) представляет собой суперпозицию диффузного гало, относящегося к аморфной фазе, и серии узких пиков. Этот образец был получен в результате термостатирования α -**I** при 120°C в течение 1 ч и содержит небольшую примесь продукта термического разложения. Площадь под гало превышает суммарную площадь под узкими пиками. Учитывая незначительную степень разложения (на глубину 4.2%), можно заключить, что аморфная составляющая преимущественно относится к соединению **I**, а не к продукту его разложения.

Узкие рефлексы на кривой 3 (рис. 7) индицируются в орторомбической элементарной ячейке с параметрами $a = 11.345$, $b = 22.35$, $c = 20.62$ Å, $V = 5228.4$ Å³, $Z = 8$ (табл. 1). Плотность β -**I**, вычисленная с использованием этих параметров,

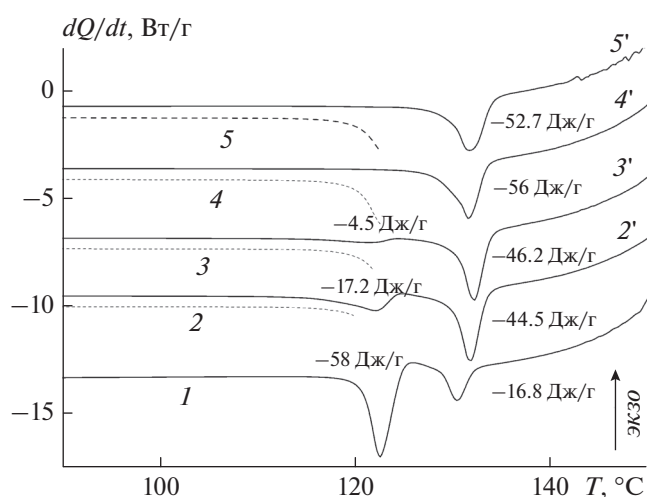


Рис. 5. Кривые ДСК и тепловые эффекты процессов ПП α -**I** $\rightarrow$ β -**I** и плавления при скорости нагрева 10 К/мин: 1–4, 5 – первый нагрев, 2'–4', 5' – повторный нагрев (2'–4' – непосредственно после первого нагрева, 5' – через 48 ч выдержки образца при 25°C). Температура начала охлаждения при термоциклировании: 120 (2), 122 (3), 123°C (4, 5). Кривые смещены вдоль оси ординат для наглядности.

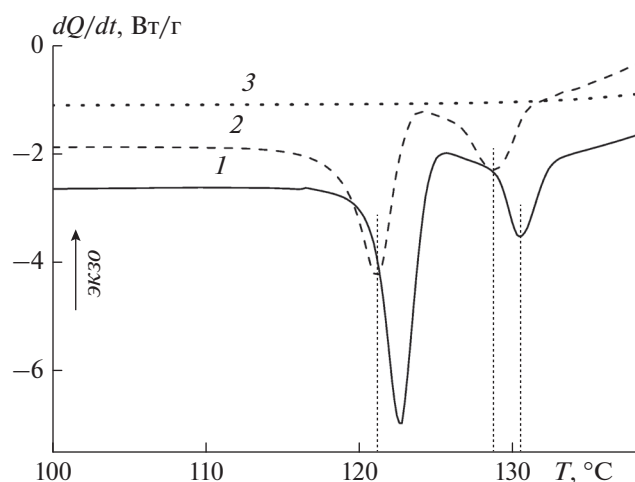


Рис. 6. Кривые ДСК, полученные при скорости нагрева 10 К/мин для образцов **I**: исходного (1), после выдержки при 95°C в течение 1000 мин (2) и после выдержки при 105°C в течение 1200 мин (3).

равна $d_{\text{выч}} = 1.907$ г/см³. Плотность исходной α -модификации **I** при -173°C (с монокристаллическими параметрами орторомбической ячейки $a = 10.9977$, $b = 12.1104$, $c = 18.9442$ Å, $V = 2523.11$ Å³, $Z = 4$ [17]) равна 1.975 г/см³ и падает до ~ 1.90 г/см³ вблизи точки ПП.

β -Модификация **I** кинетически довольно стабильна при нормальных условиях: повторная съемка порошковой рентгенограммы спустя 17 дней после

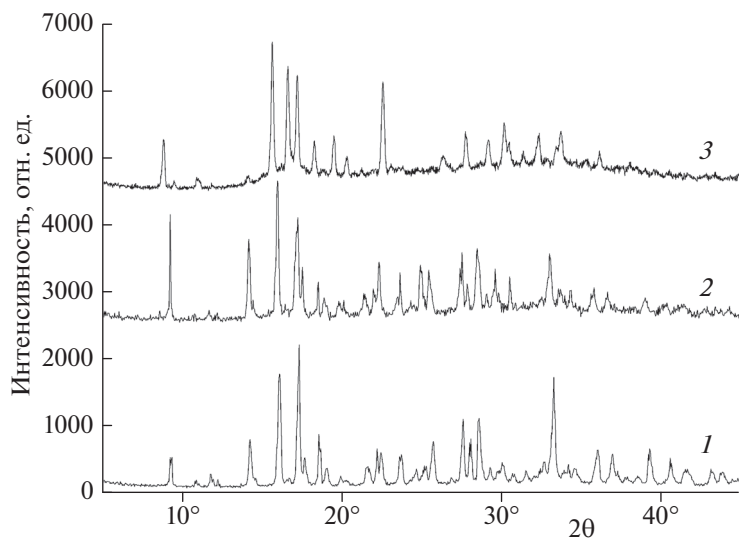


Рис. 7. Порошковые рентгеновские дифрактограммы исходного α -I при комнатной температуре (1), α -I при 388 K (2) и β -I при комнатной температуре (3).

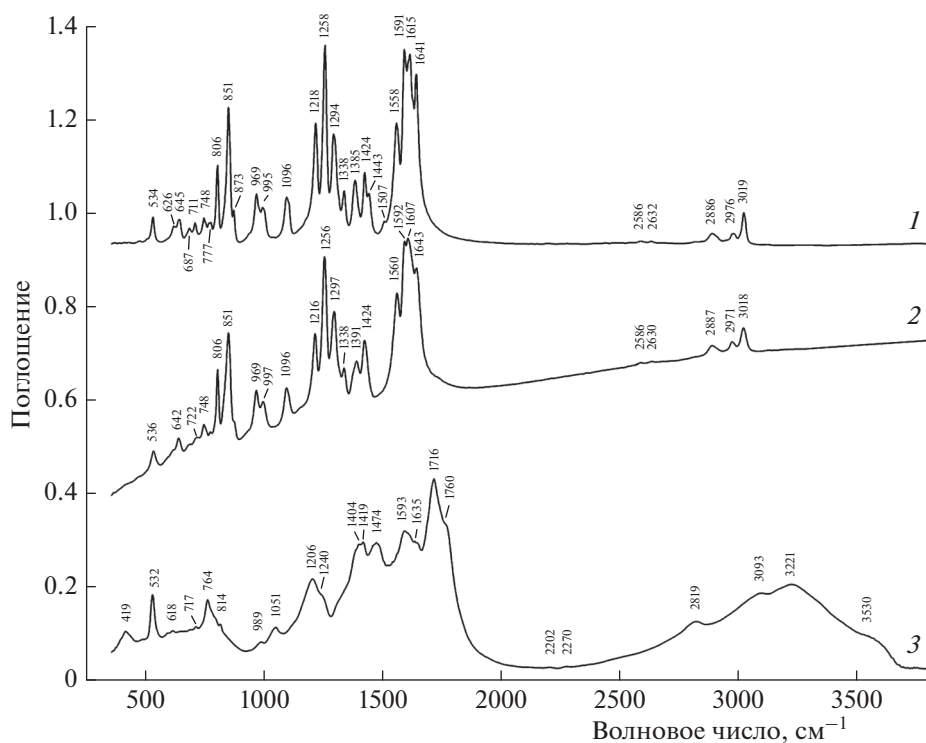


Рис. 8. ИК-спектры исходного соединения I (1), продукта ПП β -I $\rightarrow$ α -I при давлении 5 кбар (2) и твердого продукта термического разложения I (3).

ПП α -I $\rightarrow$ β -I не выявила существенных изменений. В то же время, как показывают данные ИК-спектроскопии (рис. 8), обратный переход β -I $\rightarrow$ α -I может быть реализован в течение 1 мин при давлении 5 кбар. ИК-спектр продукта обратного ПП (кривая 2 на рис. 8) близок к спектру исходного

α -I, но отличается от последнего худшей разрешенностью полос поглощения, что говорит о его структурной неупорядоченности. Кроме того, ИК-спектр продукта ПП β -I $\rightarrow$ α -I характеризуется повышенным рассеянием в области высоких частот, что типично для тех случаев, когда прессование с ис-

Таблица 1. Порошковые рентгенографические данные для β -модификации I

<i>I</i> , %	<i>d</i> _{изм.} , Å	<i>d</i> _{выч.} , Å	<i>hkl</i>
37	9.99	9.94	101
4	9.32	9.36	012
6	8.12	7.96	120
5	5.96	5.96	131
100	5.67	5.67	200
75	5.34	5.33	132
69	5.16	5.155	004
27	4.86	4.87, 4.85	141, 212
29	4.55	4.54	222
11	4.37	4.37	203, 051
4	4.18	4.16	150
69	4.12	4.12	005
4	3.87	3.88, 3.87	105, 025
3	3.85	3.86	152
11	3.39	3.40, 3.38	231, 054
22	3.21	3.20	225
19	3.06	3.07, 3.05	170, 304
36	2.96	2.95	007
20	2.95	2.95	172
7	2.86	2.86	245, 351
21	2.77	2.77	081, 315
10	2.67	2.67	255
28	2.66	2.66	353

Примечание. Курсивом выделены рефлексы, предположительно относящиеся к примеси продукта разложения I.

пользованием КВг в качестве трансмиссионной среды сопровождается изменением объема (на-
пример, в результате ПП или дегидратации).

В ИК-спектре твердого продукта термического разложения I (кривая 3 на рис. 8) присутствуют полосы аминогрупп (в диапазоне 2800–3300 см⁻¹) и карбонильных групп (интенсивный пик при 1716 см⁻¹ с плечом при 1760 см⁻¹). В частности, полоса при 2819 см⁻¹ относится к N–H-связям, имеющим слабокислотную природу. Полосы в диапазонах 1200–1500 и 1500–1650 см⁻¹ обусловлены соответственно колебаниями сопряженных и двойных связей, образуемых атомами углерода и азота. Полосы нитрогрупп в ИК-спектре твердого продукта термического разложения I отсутствуют. Плечо при 3530 см⁻¹ относится к валентным колебаниям OH-групп или адсорбированных молекул воды.

Имеющихся данных, конечно, недостаточно для трактовки механизма термического разложения соединения I. Молекула этого вещества содержит две эксплозифорные группы – нитраминную и тринитроэтильную. Хорошо известно, что

реакционная способность тринитроэтильной группы значительно выше, чем нитраминной. Поэтому с учетом состава образующихся газообразных продуктов с уверенностью можно утверждать, что лимитирующей стадией процесса является гомолитический разрыв связи C–NO₂ тринитроэтильной группы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При температурах 22–300 °C изучены термические превращения 2,4,6-трис(2,2,2-тринитроэтилнитрамино)-1,3,5-триамина. При 120 °C зафиксировано и подробно исследовано полиморфное превращение α -I $\rightarrow$ β -I, которому предшествует резкое возрастание объема элементарной ячейки и аморфизация I. ПП сопровождается значительным возрастанием скорости термического разложения соединения I. При нормальных условиях фаза β -I стабильна, но обратное ПП с образованием дефектной фазы α -I может быть реализовано при давлении 5 кбар. Термическое разложение I лимитируется разрывом связи C–NO₂ тринитроэтильной группы.

Работа выполнена в рамках госзадания: регистрационные номера АААА-А19-119101690058-9 и АААА-А17-117040610346-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуканов Н.В., Чапышев С.В., Неделько В.В. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 19.
2. Захаров В.В., Чуканов Н.В., Зюзин И.Н. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 2. С. 3; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19020146>
3. Dharavath S., Zhang J., Imler G.H. et al. // J. Mater. Chem. A. 2017. V. 5. P. 4785; <https://doi.org/10.1039/C7TA00730B>
4. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 53; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20030061>
5. Haiges R., Christe K.O. // Inorg. Chem. 2013. V. 52. № 12. P. 7249.
6. Wang Y., Qi C., Song J.-W. et al. // J. Mol. Model. 2013. V. 19. P. 1079.
7. Неделько В.В., Шастин А.В., Захаров В.В. и др. // Матер. VII Всерос. конф. "Энергетические конденсированные системы". Черногловка: ИПХФ РАН, 2014. С. 31.
8. Чуканов Н.В., Дубихин В.В., Раевский А.В. и др. // ЖФХ. 2006. Т. 80. № 2. С. 350.
9. Чуканов Н.В., Дубовицкий В.А., Захаров В.В. и др. // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 5. С. 99.
10. Chukanov N.V., Golovina N.I., Nedelko V.V. et al. // Proc. 32nd Intern. Ann. Conf. of ICT Karlsruhe: Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, 2001. P. 101/1.
11. Chukanov N.V., Raevskii A.V., Golovina N.I. et al. // Proc. 33rd Intern. Ann. Conf. of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, 2002. P. 105/1.
12. Chukanov N.V., Korsounskii B.L., Nedel'ko V.V. et al. // Proc. 37th Intern. Ann. Conf. of ICT. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für Chemische Technologie, 2006. P. 29/1.
13. Chukanov N.V., Zakharov V.V., Korsounskii B.L. et al. // Cent. Eur. J. Energ. Mater. 2016. V. 13. № 2. P. 483; <http://www.wydawnictwa.ipo.waw.pl/cejem/Vol-13-Number-2-2016/Chukanov.pdf>
14. Чуканов Н.В., Захаров В.В., Червонный А.Д. и др. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 10. С. 18; <https://doi.org/10.7868/S0207401X14100021>
15. Захаров В.В., Чуканов Н.В., Червонный А.Д. и др. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 11. С. 47; <https://doi.org/10.7868/S0207401X14110107>
16. Захаров В.В., Чуканов Н.В., Шилов Г.В. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 4. С. 45.
17. Захаров В.В., Чуканов Н.В., Ларикова Т.С. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2020. № 1. С. 118.
18. Корепин А.Г., Шастин А.В., Глушакова Н.М. и др. // Там же. 2019. № 3. С. 610.
19. Гальперин Л.Н., Колесов Ю.Р., Зеленов Н.А. // Измер. техника. 1981. № 4. С. 23.
20. Akahira T., Sunose T. // Res. Rep. Chiba Inst. Technol. (Sci. Technol.). 1971. V. 16. P. 22.