

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 541.127; 547.461

КИНЕТИКА РАЗЛОЖЕНИЯ 1,1-ДИАМИНО-2,2-ДИНИТРОЭТИЛЕНА (FOX-7). 4. СРАВНЕНИЕ РЕАКЦИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ FOX-7 И ЕГО ДИАЗАЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ

© 2022 г. Г. М. Назин¹, **В. В. Дубихин¹**, А. И. Казаков^{1*}, А. В. Набатова¹,
Б. Э. Крисюк¹, Н. Н. Волкова¹, А. В. Шастин¹

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

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

Поступила в редакцию 04.02.2021;

после доработки 08.04.2021;

принята в печать 20.04.2021

Манометрическим и калориметрическим методами исследована кинетика термического разложения диазациклических производных 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (FOX-7) в разбавленном растворе нитробензола и в твердой фазе. Данные по энергии активации, полученные для раствора, использованы для сравнения с квантовохимическими расчетами и установления связи стабильности соединений со строением молекул. Разложение этих производных в растворе протекает по такому же механизму, как и разложение FOX-7. Их энергии активации уменьшаются при увеличении длины связи С=С и находятся в хорошем соответствии с литературными данными по квантовохимическим расчетам. По характеру разложения в твердом состоянии эти соединения значительно отличаются от FOX-7. Это различие связано с тем, что конденсированные продукты их разложения являются не твердыми, а жидкими соединениями.

Ключевые слова: 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен, диазациклические производные FOX-7, термическое разложение, раствор, твердая фаза.

DOI: 10.31857/S0207401X22040069

ВВЕДЕНИЕ

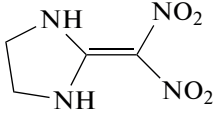
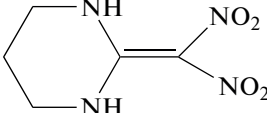
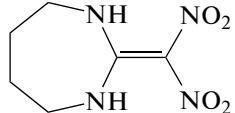
Интерес к кинетическому изучению 2-(динитрометил)-1,3-диазациклопентана (I), 2-(динитрометил)-1,3-диазациклогексана (II) и 2-(динитрометил)-1,3-диазациклопептана (III) (табл. 1) в значительной степени связан с тем, что все они являются аналогами известного взрывчатого вещества 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (FOX-7), при разложении которого в твердом состоянии был обнаружен ряд закономерностей, не свойственных другим нитросоединениям [1–5]. Представляет большой интерес узнать, в какой мере эти необычные закономерности распада FOX-7 сохраняются у его ближайших аналогов — соединений I–III.

Главная особенность FOX-7 заключается в двухстадийном характере его разложения в твердой фазе. Эта особенность в наиболее яркой форме проявляется при исследовании разложения FOX-7 методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в потоке инертного газа. При самых разных скоростях линейного нагрева наблюдается два пика тепловыделения, разделенных температурным интервалом, превышающим 50 °С, и оба пика обусловлены разложением самого FOX-7.

Было доказано [3], что первая стадия — это побочный процесс, связанный с сублимацией и быстрым разложением вещества в газовой фазе. Уникальность газофазной реакции заключается в том, что одним из ее продуктов является тугоплавкое и нелетучее при температуре опыта соединение, которое осаждается на поверхности кристаллов в виде тонкой пленки, препятствующей сублимации. В условиях потока пленка образуется медленно, и в области первого пика тепловыделения теряется до 40% массы вещества. В замкнутых сосудах первая стадия заканчивается быстро. Доля вещества, распавшегося в первой стадии, зависит от отношения массы навески m к свободному объему V и может быть очень мала. Дальнейшее разложение идет в твердой фазе “под пленкой”, разрушение которой сопровождается резким подъемом скорости.

В отличие от всех других нитросоединений разложение FOX-7 протекает без образования жидкой фазы. Реакция идет по типу “Твердое → твердое + Газ”. Твердый остаток представляет собой порошок с частицами наноразмера, который не проявляет каталитической активности.

Таблица 1. Структурные формулы соединений FOX-7 и I–III

Соединение	Структурная формула
FOX-7	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N} \quad \text{NO}_2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}=\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H}_2\text{N} \quad \text{NO}_2 \end{array}$
I	
II	
III	

Экспериментальное исследование разложения соединений I–III проводилось в работах [6, 7]. В [6] исследование выполнено методом ДСК в потоке аргона. Максимальное тепловыделение для I–III происходит при температурах 207–263°C, т.е. находится в области первого пика разложения FOX-7 (235°C). Однако второй пик тепловыделения у всех трех соединений отсутствует. Можно сделать вывод, что в отличие от FOX-7 разложение его аналогов в потоке аргона протекает в одну ста-

дию. Температура, при которой достигается максимум скорости, уменьшается в ряду

$$\text{I} \gg \text{II} \approx \text{FOX-7} > \text{III}. \quad (\text{a})$$

Этот ряд не совпадает с рядом повышения летучести

$$\text{FOX-7} < \text{I} < \text{II} \approx \text{III}. \quad (\text{b})$$

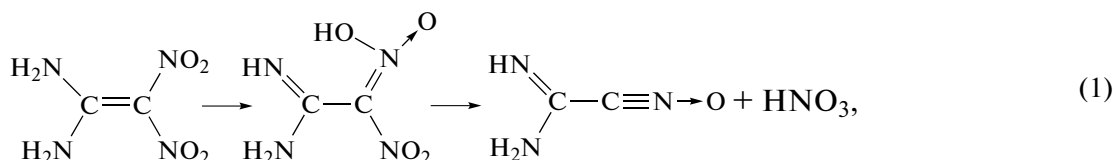
Отсюда можно сделать вывод, что вещества отличаются не только летучестью, но и скоростью разложения в газовой фазе. Соединение I является более летучим, чем FOX-7 [7], и в то же время пик тепловыделения у него находится при более высокой температуре, чем у FOX-7. Поэтому надежный вывод, который можно сделать из работы [6], заключается в том, что соединение I в газовой фазе более стойко, чем FOX-7.

В работе [7] кинетика тепловыделения исследована в замкнутых сосудах. Реакция имеет автокаталитический характер с ярко выраженным периодом индукции, длительность которого уменьшается в ряду

$$\text{FOX-7} \gg \text{I} > \text{II} \approx \text{III}. \quad (\text{c})$$

Можно отметить, однако, что этот ряд может и не соответствовать порядку изменения стабильности, так как период индукции в значительной степени зависит от скорости каталитического процесса, а не начальной стадии.

Квантовохимический расчет энергии активации для различных каналов распада [6] показал, что для соединений I–III наиболее выгодным каналом является изомеризация в нитроновую кислоту:



т.е. сохраняется механизм, установленный ранее для FOX-7 [3]. Энергия активации, а следовательно, и стабильность уменьшаются в ряду

$$\text{I} > \text{III} > \text{FOX-7} \approx \text{II}. \quad (\text{d})$$

В данной работе предпринято более детальное исследование реакций разложения соединений I–III. Реакции изучены не только в твердом состоянии, но и в разбавленных растворах инертных растворителей. Ранее было установлено, что общей закономерностью реакций разложения нитроолефинов с аминогруппой в *цис*-положении является независимость скорости реакции разложения от полярности растворителя. Это характерно и для FOX-7 [5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использованные в данной работе образцы FOX-7 и аппаратура для манометрических и калориметрических измерений при повышенных давлениях описаны в работах [3, 4]. Вещества синтезированы по методике, описанной в работе [9]

Разложение в растворе. Как показано в работах [5, 8], реакции изомеризации amino-нитроолефинов протекают с незначительным изменением дипольного момента, и поэтому их скорость не зависит от полярности среды. В связи с этим разложение соединений I–III было изучено только в одном растворителе, нитробензоле, который отличается высокой стабильностью, инертен к действию NO₂ и хорошо растворяет I–III.

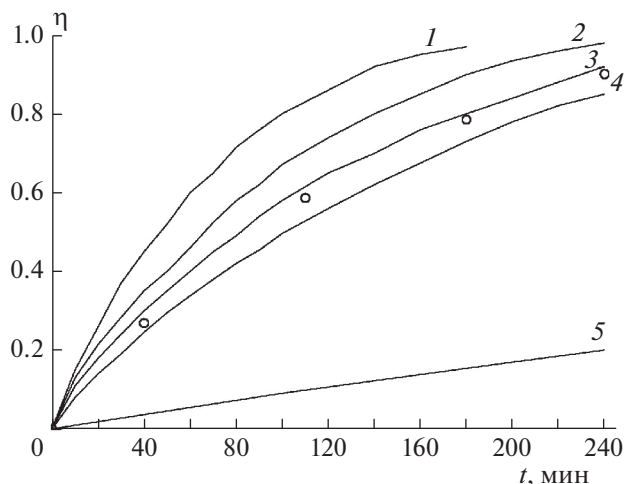


Рис. 1. Примеры кинетических кривых разложения соединений **I**, **II** и **III** в растворе нитробензола при концентрации 1.0 мас.%. Соединение, температура (°C): 1 – **II**, 210; 2 – **III**, 210; 3 – **II**, 200; 4 – **III**, 200; 5 – **I**, 220. Кружки соответствуют экспериментальным точкам разложения соединения **I** при 250°C.

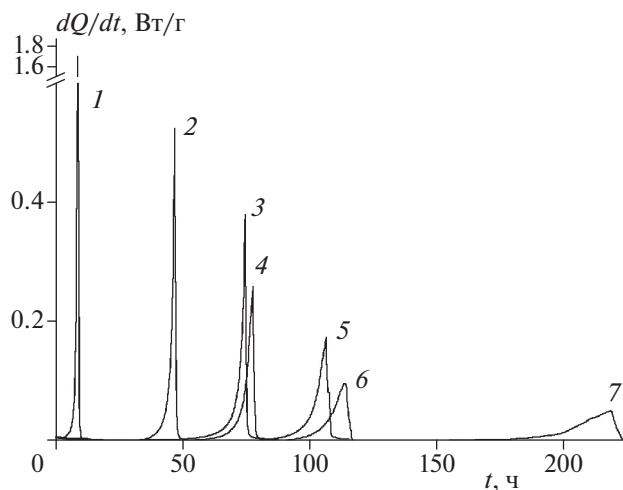


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения от времени при термическом разложении соединения **I**. Температура (°C), $m/V \cdot 10^3$ (г/см³): 1 – 210.5, 11.8; 2 – 199.8, 7.3; 3 – 199.8, 3.6; 4 – 197.7, 8.2; 5 – 187.6, 8.3; 6 – 181.2, 8.7; 7 – 175.5, 10.0.

Примеры кинетических кривых газовыделения для соединений **I–III** показаны на рис. 1. Видно, что наибольшую скорость разложения имеет соединение **II**, но разница между соединениями **III** и **II** невелика. Разложение **I** идет значительно медленнее, чем разложение соединений **II** и **III**. Соединение **I** имеет при 250°C такую же скорость разложения, как и **II** при 220°C. Все реакции хорошо описываются уравнением 1-го порядка. Кинетические параметры разложения соединений **I–III** в нитробензоле представлены в табл. 2. В этой же таблице приведены данные для FOX-7, взятые из работы [5].

Разложение в твердой фазе. Кинетика разложения соединений **I–III** изучена калориметрическим методом. Первичные кинетические кривые в координатах “скорость тепловыделения – время” при разных температурах для всех трех соединений показаны на рис. 2–4.

Начальная побочная реакция разложения через газовую фазу, отчетливо проявляющаяся в случае FOX-7 [3], заметна также и для соединений

I–III. Во всех трех случаях в начале разложения наблюдается тепловыделение, идущее с уменьшающейся скоростью (рис. 5). После окончания этой реакции образец окрашивается в темно-коричневый цвет. Как и у FOX-7, при $m/V \sim 10^{-2}$ г/см³ глубина разложения, которая достигается в результате прохождения газофазной реакции, ничтожно мала.

Конденсированные продукты, которые остаются после разложения соединений **I–III**, представляет собой вязкую жидкость черного цвета. На примере соединения **III** было показано, что добавление этого остатка к свежей порции вещества приводит к резкому увеличению скорости разложения (рис. 6), т.е. конечные продукты распада проявляют высокую каталитическую активность.

В каждом опыте был определен полный тепловой эффект реакции Q_{∞} . После этого кинетические кривые были преобразованы обычным способом к интегральной зависимости $Q_{\text{тек}}(t)$ и для устранения ошибок, допущенных при определе-

Таблица 2. Кинетические параметры разложения FOX-7 [5] и соединений **I–III** в растворе и в твердой фазе

Соединение	ΔT , °C	E , кДж/моль	$\log(A, \text{с}^{-1})$	ΔT , °C	E , кДж/моль	$\log(A, \text{с}^{-1})$
	нитробензол			твердая фаза		
FOX-7	180–240	149.0 ± 8.4	11.9 ± 0.9	170–230	161.2 ± 8.4	11.3 ± 0.9
I	200–220	154.5 ± 5.0	11.3 ± 0.5	175–210	140.6 ± 1.8	8.7 ± 0.9
II	180–210	130.2 ± 7.9	10.5 ± 0.9	160–187	136.5 ± 7.9	10.0 ± 0.9
III	180–220	118.1 ± 8.8	8.7 ± 1.0	160–187	121.4 ± 4.6	7.9 ± 0.5

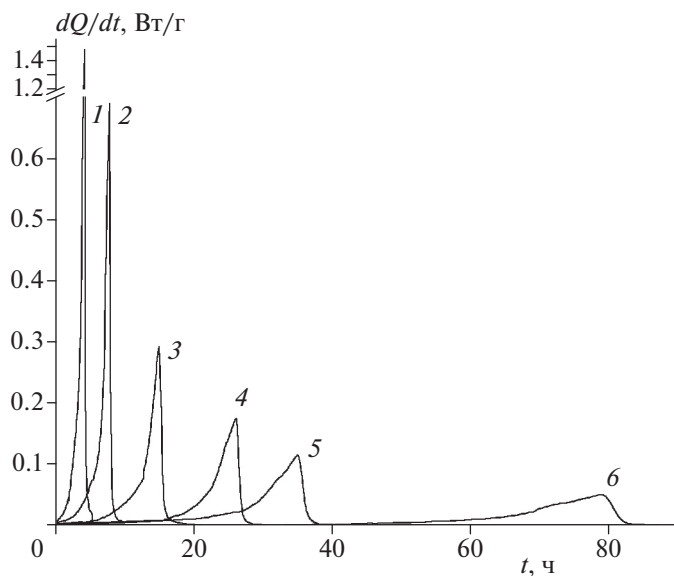


Рис. 3. Зависимость скорости тепловыделения от времени при термическом разложении соединения **II**. Температура ($^{\circ}\text{C}$), $m/V \cdot 10^3$ (г/см 3): 1 – 187.2, 8.2; 2 – 181.2, 8.4; 3 – 175.5, 6.3; 4 – 170.6, 9.1; 5 – 166.6, 9.4; 6 – 160.0, 8.6.

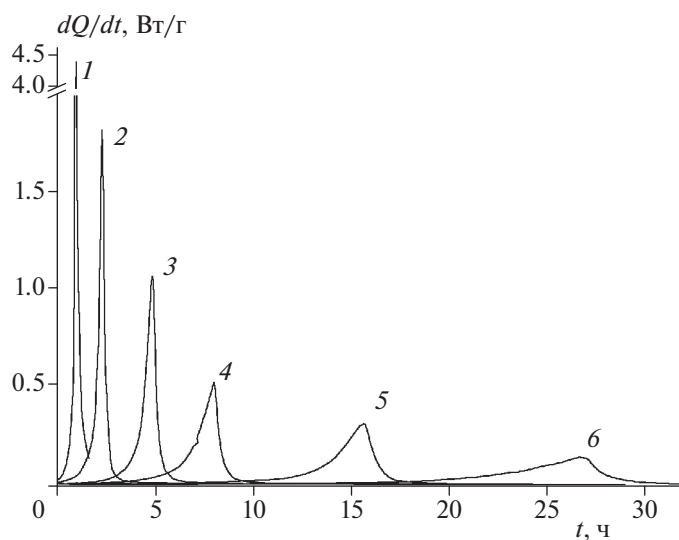


Рис. 4. Зависимость скорости тепловыделения от времени при термическом разложении соединения **III**. Температура ($^{\circ}\text{C}$), $m/V \cdot 10^3$ (г/см 3): 1 – 187.2, 8.9; 2 – 180.6, 8.9; 3 – 175.5, 10.2; 4 – 170.6, 9.5; 5 – 166.2, 5.2; 6 – 160.0, 8.3.

нии m/V , они приведены к виду $\eta(t)$, где η – степень разложения, равная отношению текущей теплоты к полному тепловому эффекту реакции: $\eta = Q_{\text{тек}}/Q_{\infty}$. Для соединения **I** эти данные приведены на рис. 7. Сравнение кинетических кривых тепловыделения для соединений **II** и **III** приведено на рис. 8. Из рис. 7 и 8 видно, что, в твердой фазе, как и в растворе, наименее стабильным является соединение **II**. При этом различие между соединениями **III** и **II** невелико, и оба этих вещества по стабильности в твердой фазе значительно уступают **I**.

Разложение **I–III** в твердой фазе характеризуется сильным ускорением. Скорость каталитической реакции сильно зависит от величины отношения m/V . В то же время на начальных участках, как видно из рис. 2, на котором приведены результаты опытов при 198°C и двух значениях m/V , влияния отношения m/V на начальную стадию не наблюдается. Значение констант скорости начальной стадии, k_1 , были определены путем экстраполяции удельной скорости $d\eta/dt(1 - \eta)$ к значению $t = 0$. Полученные данные представлены в табл. 1 и на рис. 9.

Из сравнения рис. 1 с рис. 7 и 8 следует, что скорость разложения на стадии ускорения в твердой фазе намного превышает скорость реакции в растворе. Константа скорости, описывающая стадию ускорения разложения, например, вещества **I**, в сотни раз больше, чем k_1 . Кроме того, необходимо отметить, что максимум скорости разложения в твердой фазе наблюдается в конце реакции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Независимость k_1 от полярности растворителя позволяет использовать экспериментальные данные, полученные в растворе, для сравнения с квантовохимическими расчетами энергии активации, выполненными для реакции в газовой фазе. Соответствующие данные приведены в табл. 3. Из этой таблицы видно, что наименьшее экспериментальное значение k_1 имеет соединение **I**. При 200°C k_1 увеличивается в ряду



причем между FOX-7 и **III** различие в значениях k_1 является небольшим. Самое заметное приращение энергии активации и, соответственно, уменьшение скорости наблюдается для соединения **I**. Такой же вывод следует из рассмотрения расчетных данных работы [6] по энергии активации для реакции переноса атома Н на атом кислорода нитрогруппы, т.е. для реакции (1). Отметим, что ряд (е) не совпадает ни с одним из рядов (а), (с), (d), построенных по данным работ [6, 7]. В то же время последовательность (е), по-видимому, наиболее правильно отражает связь стабильности со строением молекулы. По крайней мере она лучше, чем другие ряды, коррелирует с такой важной структурной характеристикой молекулы, как длины связи C=C ($l_{\text{C=C}}$).

Реакция (1) представляет собой согласованный процесс, идущий через шестичленное переходное состояние, в котором наряду с образованием новых связей происходит одновременный разрыв связи N—N и π -связи между атомами углерода. Как показано в работах [6, 11], длина, а сле-

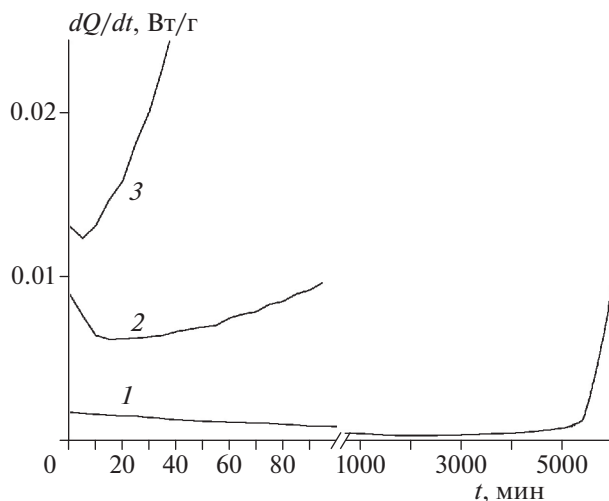


Рис. 5. Начальные участки скоростных кривых тепло-выделения соединений **I** (1), **III** (2) и **II** (3) при 181.2°C.

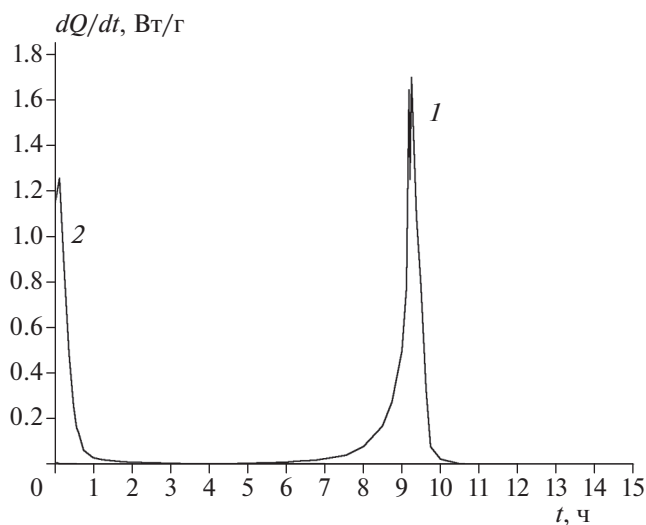


Рис. 6. Влияние конечных продуктов на скорость разложения соединения **I** при 210.5°C: 1 — исходное вещество, $m = 30.7$ мг; 2 — смесь соединения **I** (11.7 мг) с продуктами разложения (6 мг).

Таблица 3. Сравнение эксперимента с расчетом

Соединение	$E_{\text{раств}},$ кДж/моль	$10^5 k_1, \text{с}^{-1}$ при 200°C	$E_{\text{расч}},$ кДж/моль [6]	Длина связи C=C, Å		Угол поворота нитрогрупп, град [11]
	эксперимент в нитробензоле			расчет [7]	в кристалле	
FOX-7	149.0	2.8	131.3	1.4248	1.450 [10]	—
I	154.5	0.17	140.3	1.4115	1.439 [11]	2.0
II	130.2	13.0	130.2	1.4401	1.473 [11]	89.0
III	118.1	4.8	136.8	1.4361	1.473 [11]	79.3

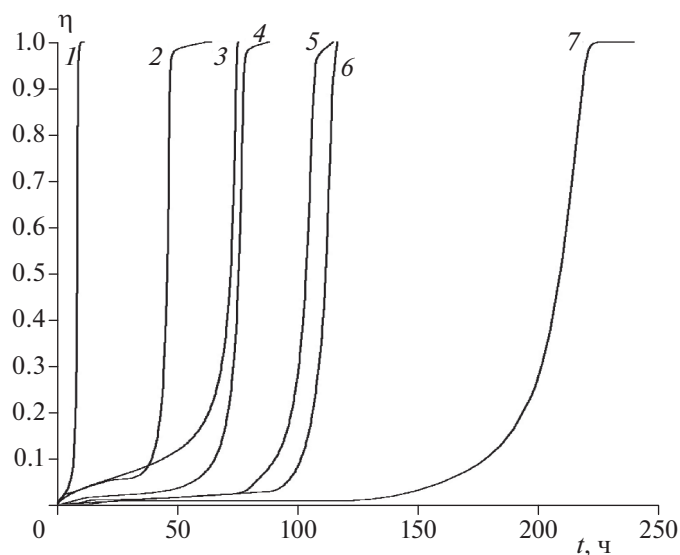


Рис. 7. Зависимость глубины реакции η от времени при термическом разложении соединения **I** в твердой фазе. Температура ($^{\circ}\text{C}$), $m/V \cdot 10^3$ (г/см 3): 1 – 210.5, 11.8; 2 – 199.8, 7.3; 3 – 199.8, 3.6; 4 – 197.7, 8.2; 5 – 187.6, 8.3; 6 – 181.2, 8.7; 7 – 175.5, 10.0.

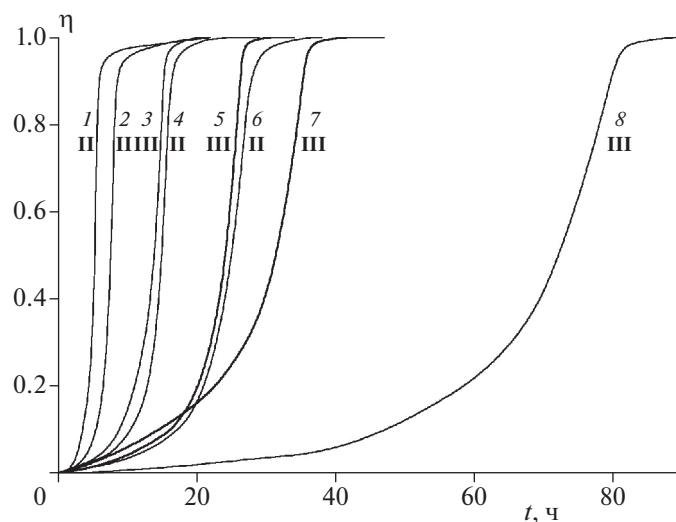


Рис. 8. Сравнение кинетических кривых разложения соединений **II** и **III** в твердой фазе при 175.5 (1, 3), 170.6 (2, 5), 166.6 (4, 7) и 160 $^{\circ}\text{C}$ (6, 8) при $m/V = (5 \div 10) \cdot 10^3$ г/см 3 .

довательно, и прочность связи $\text{C}=\text{C}$ сильно зависят от строения молекул. В свою очередь, уменьшение прочности связи $\text{C}=\text{C}$ приводит к снижению энергии активации разложения.

Длина связи $l_{\text{C}=\text{C}}$ в FOX-7 и его аналогах имеет промежуточное значение между $l_{\text{C}=\text{C}}$ в этилене (1.33 Å) и в этане (1.54 Å), т.е. длина связи $\text{C}=\text{C}$ в этих соединениях близка к полуторной. Причиной удлинения связи $\text{C}=\text{C}$ является сопряжение (перекрывание) p -орбиталей атомов углерода с неподеленной парой электронов, которая занимает одну из sp^3 -орбиталей атомов азота как в

амино-, так и в нитрогруппе. При этом в аминогруппе sp^3 -орбиталь, несущая неподеленную пару электронов, расположена в вершине тригональной пирамиды и наклонена относительно вертикальной линии p -орбиталей атомов C, что затрудняет взаимодействие электронных орбиталей атомов C и N. При уплощении диазацикла сопряжение между аминогруппой и связью $\text{C}=\text{C}$ будет усиливаться. В нитрогруппе неподеленная пара электронов образует донорно-акцепторную связь с атомами кислорода. Ее орбиталь охватывает оба атома кислорода и имеет форму диска, лежащего

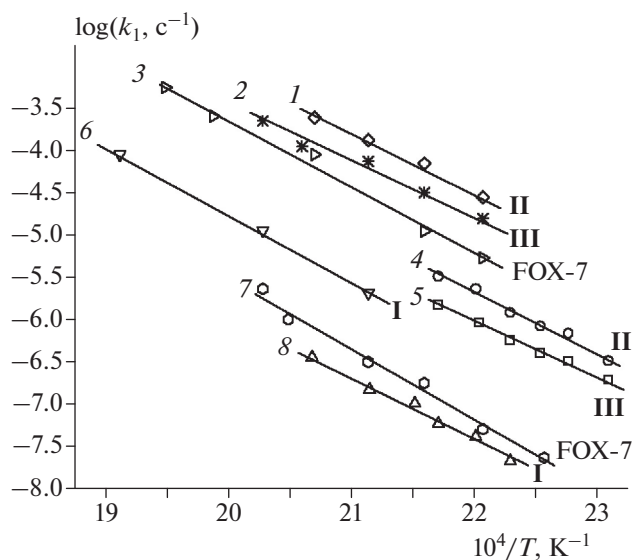


Рис. 9. Аррениусовская зависимость константы скорости начальной стадии разложения соединений I, II, III и FOX-7 в растворе (1, 2, 3, 6) и в твердой фазе (4, 5, 7, 8).

в плоскости нитрогруппы. При перпендикулярном расположении этой плоскости относительно направления p -орбиталей атомов углерода сопряжение π -связи с нитрогруппой невозможно. Для возникновения этого сопряжения необходимо, чтобы произошел разворот плоскостей нитрогрупп относительно друг друга или поворот нитрогрупп относительно связи $C=C$.

По данным работы [11] в 1,1-диiod-2,2-динитроэтилене, который имеет плоское строение, $l_{C=C} = 1.33 \text{ \AA}$, т.е. в этом соединении влияние нитрогрупп на $l_{C=C}$ отсутствует. В соединении I нитрогруппы также практически не выходят из плоскости, перпендикулярной направлению p -орбиталей атомов углерода. Угол ϕ , определяемый как угол между CNN -плоскостями 1,1- и 2,2-заместителей, равен всего 2° , как и аналогичный угол в диiodпроизводном. Тем не менее из-за сопряжения двойной связи с аминогруппами $l_{C=C}$ в I значительно увеличена. В соединениях II и III нитрогруппы фиксируются в положениях, которые соответствуют увеличению угла ϕ до 79° и 89° . При таком повороте нитрогрупп, по-видимому, создаются условия для их сопряжения со связью $C=C$. По сравнению с I $l_{C=C}$ в этих соединениях увеличивается, хотя и не очень сильно. Сам поворот нитрогрупп может быть простимулирован образованием сильных внутримолекулярных водородных связей [12]. Прочность этих связей зависит от расстояния между атомами водорода аминогрупп и атомами кислорода нитрогрупп. Самое большое расстояние между H и O и, соответственно, самая слабая водородная связь наблюдаются в соединении I [12].

При разложении соединений I–III в твердой фазе порядок изменения скорости реакции в их ряду сохраняется таким же, как в растворе. Однако при сравнении этих соединений с FOX-7 наблюдаются значительные различия. Отношение констант $k_{\text{раств}}/k_{\text{тв}}$ для соединений I–III не превышает 10, в то время как для FOX-7 оно равно 100. Скорость разложения I в растворе на два порядка ниже, чем в случае с FOX-7, а в твердом состоянии эта разница уменьшается до двух раз. Обычно энергия активации в твердой фазе ($E_{\text{тв}}$) равна или незначительно выше, чем в жидкой ($E_{\text{ж}}$), а в случае I, наоборот, $E_{\text{тв}} < E_{\text{ж}}$. При этом ошибка эксперимента значительно меньше наблюдаемой разницы в энергиях активации.

Все эти аномалии, проявляющиеся в твердой фазе, связаны с тем, что, в отличие от FOX-7, конденсирующиеся продукты, образующиеся при разложении I–III, являются не твердыми, а жидкими (даже при комнатной температуре) соединениями. Взаимодействуя с этими продуктами, исходные вещества сами переходят в жидкое состояние. Кроме того, жидкие продукты проявляют высокую каталитическую активность.

В соответствии с детальным механизмом реакций, установленным в [3], в продуктах распада соединений I–III должны появляться первичные аминосоединения алифатического ряда. Будучи достаточно сильными основаниями, эти вещества могут взаимодействовать с *гем*-динитроолефинами с образованием термически неустойчивых молекулярных комплексов донорно-акцепторного типа, предельной формой которых являются комплексы с переносом заряда. Можно ожидать, таким образом, что катализ разложения соединений I–III имеет кислотно-основную природу. Отсутствие автокатализа в случае FOX-7 связано, скорее всего, с тем, что продуктами его разложения являются твердые высокоплавкие соединения, которые образуют с мелкими кристаллами FOX-7 сыпучие смеси со слабым контактом между частицами.

При разложении твердых соединений I–III наблюдается, как и в случае с FOX-7, быстрый побочный процесс сублимации и разложения в газовой фазе. При проведении опытов в запаянных сосудах часть продуктов газофазного разложения конденсируется на поверхности кристаллов и подавляет сублимацию. Тот факт, что эти продукты являются жидкими соединениями, не препятствует быстрому образованию защитной пленки. В результате этого побочная реакция при разложении соединений I–III подавляется не менее эффективно, чем в случае FOX-7. По данным работы [6], при исследовании распада соединений I–III в режиме линейного нагрева в потоке аргона торможения первой побочной стадии не наблюдается совсем. Это может быть связано с высокой летучестью низкоплавких продуктов раз-

ложения, которые сдуваются потоком аргона с поверхности кристаллов.

Из-за перехода вещества в жидкое состояние и автокаталитического действия продуктов разложение первоначально твердых соединений **I–III** заканчивается намного быстрее, чем это происходит в растворе. При соотношении констант скоростей каталитической и начальной стадий, превышающем два порядка, вклад каталитического распада в скорость реакции может стать заметным на глубине превращения менее 1%, и уже в момент прогрева наблюдаемая скорость разложения может значительно превысить скорость начальной твердофазной реакции. Последнее обстоятельство может быть причиной сравнительно слабого тормозящего эффекта твердой фазы, обнаруженного для соединений **I–III**.

После полного растворения исходного вещества в продуктах кинетика разложения должна подчиняться закономерностям жидкофазных автокаталитических реакций с выгоранием [13]. В этих реакциях концентрация катализатора дополнительно увеличивается из-за уменьшения объема жидкой фазы. Максимум скорости разложения в таких процессах наблюдается в конце реакции, что и наблюдается на опыте для соединений **I–III**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью известного приема проведения реакции в разбавленном растворе инертного растворителя определены значения констант скорости k_1 и энергии активации первой, некаталитической стадии разложения соединений **I–III**. По механизму разложения эти соединения не отличаются от FOX-7. Константа скорости k_1 растет в ряду **I** $\ll$ FOX-7 < **III** $\approx$ **II** и коррелирует с увеличением длины связи C=C. Последняя зависит от степени сопряжения двойной связи C=C с амино- и нитрогруппами. Самую большую стабильность имеет соединение **I**, в котором связь C=C является наиболее прочной.

По характеру разложения в твердой фазе соединения **I–III** значительно отличаются от FOX-7.

Продукты разложения **I–III** являются жидкими (даже при комнатной температуре), а не твердыми, как у FOX-7, соединениями. Кроме того, эти продукты сильно катализируют реакцию разложения. Автокатализ проявляется на самых ранних стадиях разложения, что затрудняет измерение истинных констант скоростей разложения в твердой фазе.

Работа выполнена на средства ИПХФ РАН в рамках выполнения госзаданий (регистрационные номера АААА-А19-119101690058-9 и АААА-А19-119100800130-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bellamy A.J. // Struct Bond. 2007. V. 125. P. 1; https://doi.org/10.1007/430_2006_054
2. Ticmanis U., Kaiser M., Pantel G. et al. // Proc. 35th Intern. Annual Conf. ICT. Karlsruhe: ICT, 2004. P. 70/1.
3. Назин Г.М., Дубихин В.В., Гончаров Т.К. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 6. С. 54.
4. Назин Г.М., Дубихин В.В., Гончаров Т.К. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 7. С. 16.
5. Назин Г.М., Дубихин В.В., Гончаров Т.К. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. С. 48.
6. Krisyuk B.E., Zakarov V.V., Chukanov N.V. et al. // Cent. Eur. J. Energ. Mater. V. 17. № 1. P. 20; <https://doi.org/10.22211/cejem/118513>
7. Volkova N.N., Kazakov A. I., Danilchik A.V. et al. // New Trends Res. Energ. Mater. Proc. 21th Semin. Czech Republic: Univ. Pardubice, 2018. P. 1143.
8. Назин Г.М., Дубихин В.В., Далингер И.Л. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 30.
9. Шастин А.В., Корсунский Б.Л., Лодыгина В.П. // ЖПХ. 2009. Т. 82. № 10. С. 1653; <https://doi.org/10.1134/S1070427209100115>
10. Crawford M.-J., Evans J., Cöbel M. et al. // Propellants Explos. Pyrotech. 2007. V. 32. № 6. P. 478; <https://doi.org/10.1002/prep.200700240>
11. Baum K., Bigelow S.S., Nguyen N. V., et al. // J. Org. Chem. 1992. V. 57. № 1. P. 235; <https://doi.org/10.1021/jo00027a042>
12. Крисюк Б.Э. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 1. С. 3; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20010057>
13. Дубовицкий Ф.И., Манелис Г.Б. Мержанов А.Г. // ДАН СССР. 1958. Т. 121. № 6. С. 668.