

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА N-АЛЛИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ 7H-ДИФУРАЗАНОФУРОКСАНОАЗЕПИНА И 7H-ТРИФУРАЗАНОАЗЕПИНА

© 2023 г. А. И. Казаков^{1*}, Д. Б. Лемперт¹, А. В. Набатова¹, Е. Л. Игнатьева¹,
Д. В. Дашко², В. В. Разносчиков¹, Л. С. Яновский^{1,3}

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

²СКТБ “Технолог”, Санкт-Петербург, Россия

³Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 02.03.2022;

после доработки 16.03.2022;

принята в печать 21.03.2022

Изучена термическая стабильность N-аллильных производных 7H-дифуразанофуроксаноазепина и 7H-трифуразаноазепина в неизотермическом и изотермическом режимах. Определены формально-кинетические закономерности распада и температурные зависимости констант скоростей реакций. Сопоставлена термическая стабильность аллильных и аминных производных азапинов.

Ключевые слова: 7H-дифуразанофуроксаноазепин, 7H-трифуразаноазепин, N-аллильные замещенные, термический распад, кинетика.

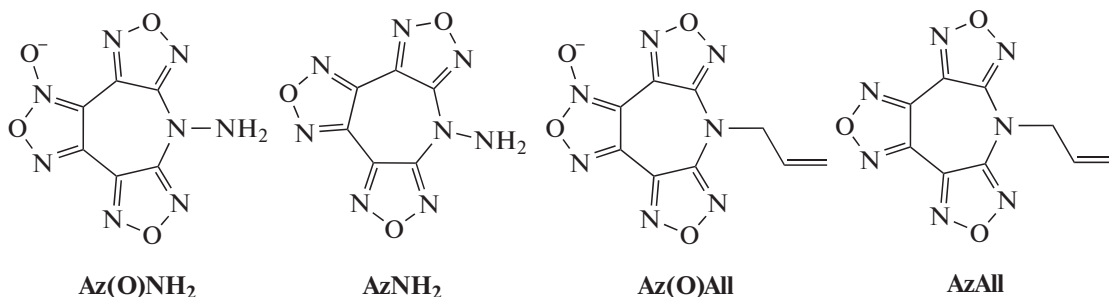
DOI: 10.31857/S0207401X23050047, **EDN:** GCPUWH

ВВЕДЕНИЕ

Химия высокоэнтальпийных азотсодержащих соединений на основе N-гетероциклов в последнее десятилетие развивается стремительными темпами [1–10]. Много внимания уделено и производным азапина с фуразановыми кольцами [11–16]. Область применения этих соединений — в основном энергоемкие композиции, взрывчатые вещества, пороха, ракетные топлива, газогенерирующие композиции. В 2019 г. была опубликована работа о перспективности использования высокоэнтальпийных азотсодержащих соедине-

ний в качестве диспергаторов газогенерирующих твердых топлив, применяемых в газогенераторных двигателях [17].

Недавно [18] были синтезированы соединения 7-аллил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепин (**Az(O)All**) и 7-аллил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепин (**AzAll**), близкие по структуре к 7-амино-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепину (**Az(O)NH₂**) и 7-амино-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепину (**AzNH₂**) [19].



Были экспериментально определены их молекулярная структура, энтальпии образования, ос-

новные физические свойства, чувствительность к удару и трению, оценена баллистическая эффек-

тивность этих соединений как компонентов смесевых твердых топлив (СТТ) и диспергаторов твердых топлив для газогенераторных двигателей. Было показано, что использовать **AzAlI** или **Az(O)AlI** в качестве энергетической высокоэнтальпийной добавки к СТТ в композициях на основе перхлората аммония, как делали успешно с другими высокоэнтальпийными компонентами [20, 21], характеризующимися низкими значениями коэффициента насыщенности кислородом α ($\alpha = 2O/(4C + H)$) малоэффективно из-за весьма низкой величины α (0.15 и 0.20 соответственно). Но в то же время было показано, что как диспергаторы твердых топлив для газогенерирующих композиций **AzAlI** и **Az(O)AlI** проявляют практически такую же баллистическую эффективность, что и широко изученное в настоящее время соединение **Az(O)NH₂** [19].

Одно из существенных отличий газогенерирующих топлив от СТТ — наличие более жестких требований к термической стабильности [22]. Первой работой по исследованию термостабильности диспергаторов на основе производных азепина было изучение термостабильности **Az(O)NH₂** в температурном интервале 190.8–231.9 °C [19]. Исследования проводили как для соединения **Az(O)NH₂** в индивидуальном состоянии, так и для топливных композиций “**Az(O)NH₂** + изопреновый каучук СКИ-3”. Установлено, что при температуре 200 °C разложение на 1% индивидуального **Az(O)NH₂** происходит в течение 95 мин, а в смеси с каучуком скорость распада увеличивается в ~7.5 раз. Настоящая работа посвящена изучению кинетики термораспада соединений **AzAlI** и **Az(O)AlI**.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения **AzAlI** и **Az(O)AlI** получали из 7*H*-трифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*:3",4"-*d*]-азепина и 7*H*-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3",4"-*d*]азепина соответственно по реакции с бромистым аллилом. Высокая чистота продуктов подтверждается результатами элементного анализа и данными ЯМР-спектроскопии [17].

Исследование кинетики тепловыделения при термическом превращении образцов **AzAlI** и **Az(O)AlI** в изотермических условиях проводили на автоматическом дифференциальном микрокалориметре ДАК-1-2 [23] в стеклянных запаянных ампулах внутренним объемом около 1 см³, не имеющих холодных частей, что позволяло сохранять все продукты превращения в зоне реакции. Навеска исследуемых веществ составляла примерно 20 мг, а величина отношения массы навески к свободному объему ампулы — примерно $5 \cdot 10^{-3}$ г/см³ при всех указанных температурах испытаний.

Численным интегрированием от нулевого до текущего момента времени t экспериментальной

зависимости скорости тепловыделения от времени находили величину количества тепла Q_t , выделившегося к данному моменту времени

$$Q_t = \int_0^t (dQ/dt) dt,$$

где dQ/dt — скорость тепловыделения, а полную теплоту реакции — интегрированием функции $dQ/dt(t)$ до времени завершения процесса разложения:

$$\int_0^\infty \frac{dQ}{dt} dt = Q_0.$$

Глубину реакции η определяли по отношению Q_t/Q_0 .

Термические превращения взрывчатых веществ (ВВ) в неизотермическом режиме изучали методами термогравиметрии (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием синхронного термического анализатора STA 449 F3 (Netzsch, Германия) в диапазоне температур 30–430 °C в потоке газообразного аргона (40 мл/мин) и скорости нагрева 5 град/мин. Для измерений использовали стандартные корундовые тигли ($V = 85$ мкл, $d = 6.8$ мм), завальцованные крышкой с отверстием. В качестве эталона использовали пустой тигель. Взвешивание осуществляли на внутренних весах анализатора с точностью $\pm 10^{-4}$ мг. Масса навески составляла ~2 мг. Перед измерением определяли базовую линию путем построения кривой коррекции с пустыми тиглями. Анализ газов, образующихся в результате разложения образца, проводили с помощью подключенного к прибору квадрупольного масс-спектрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетические закономерности тепловыделения при разложении AzAlI

На рис. 1 представлены результаты по кинетике термического разложения **AzAlI**, полученные методами ТГ и ДСК. На кривой ДСК при разложении **AzAlI** наблюдаются два эндотермических пика. Первый из них при температуре 117.3 °C отвечает плавлению соединения, теплота этого процесса равна –65.38 Дж/г. Далее с ростом температуры наблюдается только начало экзотермического процесса разложения с максимальной скоростью тепловыделения при 189 °C; затем наблюдается второй эндотермический пик при температуре 248.5 °C, отвечающий испарению образца с суммарным эндотермическим эффектом, равным –108.4 Дж/г. Общая потеря массы при достижении температуры 290 °C составила ~98.5%.

Поскольку оценка термостабильности по кривой ДСК носит вспомогательный, качественный

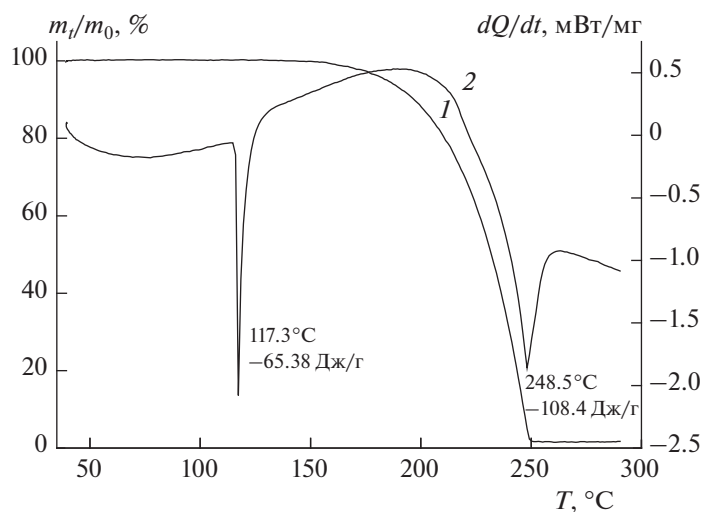


Рис. 1. Кривые ТГ (1) и ДСК (2) при термическом разложении **AzAll**. Масса навески ~2 мг, скорость нагрева — 5 К/мин, скорость продувки аргоном — 40 мл/мин.

характер, для расчета реального уровня термораспада (как функции температуры и времени) необходимо было изучить кинетику реакции в изотермических условиях с определением кинетических параметров реакции, в том числе закона зависимости скорости реакции от глубины разложения и зависимости кинетических констант от температуры.

Полученные экспериментальные кривые зависимости скоростей тепловыделения при разложении соединения **AzAll** в интервале температур 230–250.0°C в изотермических условиях представлены на рис. 2.

Полный тепловой эффект реакции термического разложения **AzAll** в изотермических экспериментах в запаянных ампулах составляет около 3 кДж/г. Форма кривых зависимости скорости тепловыделения от текущей теплоты реакции с максимумом скорости при примерно 50%-ной глубине разложения (рис. 2) свидетельствует о протекании процесса разложения по закону автокаталитической реакции первого порядка:

$$dQ/dt = Q_0 k_2 (1 - \eta)(\eta + k_1/k_2),$$

где k_1 , с^{-1} — константа скорости некаталитической реакции; k_2 , с^{-1} — константа скорости каталитической реакции. Величина полной теплоты реакции разложения, Q_0 , определяется с относительной погрешностью около 3.5%, и наблюдаемая величина количества тепла, выделяемого к моменту достижения максимальной скорости реакции (рис. 2), также определяется примерно с той же величиной относительной ошибки измерения. Возможной причиной некоторого отклонения от строгого выполнения закона автокаталитической реакции первого порядка может быть

изменение свойств жидкой реакционной смеси **AzAll** (диэлектрической проницаемости, вязкости) с увеличением глубины разложения. Таким же кинетическим законом описывается и зависимость скорости термического разложения от глубины реакции при разложении соединения **Az(O)NH₂** [19].

В интегральное уравнение зависимости текущей теплоты автокаталитической реакции первого порядка, Q_t (т.е. количества тепла, выделяемого к данному конкретному времени t), от времени входят три неизвестных параметра: полный теп-

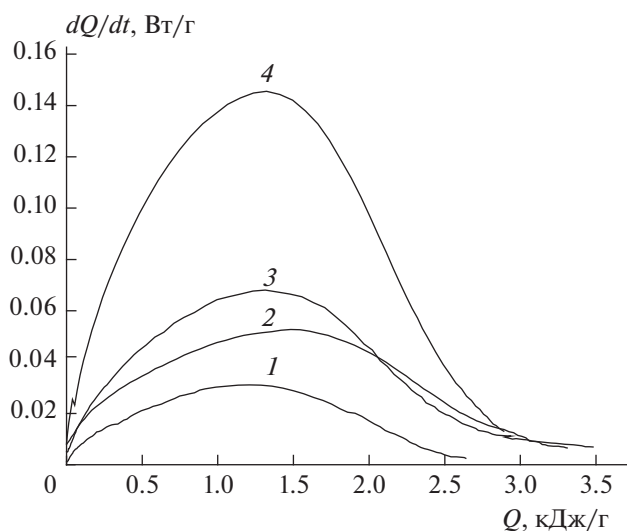


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения dQ/dt от количества тепла Q , выделившегося к данному моменту времени, при термическом разложении соединения **AzAll** при различных температурах: 1 — 230.4; 2 — 235.4; 3 — 241.0; 4 — 251.7°C.

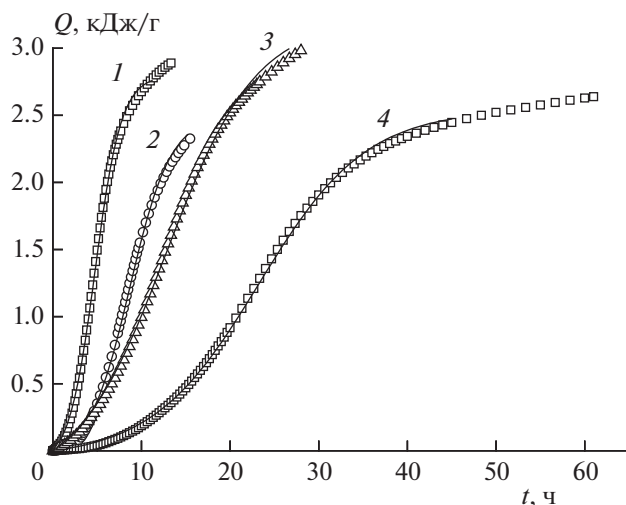


Рис. 3. Кинетические зависимости количества тепла Q_t , выделившегося при разложении соединения **AzAll**, от времени t при различных температурах: 1 – 230.4; 2 – 235.4; 3 – 241.0; 4 – 251.7 °C. Точки – эксперимент, сплошные кривые – расчет по уравнению (1).

ловой эффект реакции Q_0 , и константы скорости некаталитической, k_1 , и каталитической, k_2 , стадий реакции:

$$Q_t = (Q_0 k_1 / k_2) \{ \exp[(k_1 + k_2)t] - 1 \} / \{ 1 + (k_1 / k_2) \exp[(k_1 + k_2)t] \}. \quad (1)$$

Применение программы Origin позволяет методом фиттинга (fitting), т.е. подбора значений Q_0 , k_1 и k_2 , построить расчетную кривую зависимости текущей теплоты процесса Q_t от времени с минимальным отклонением расчетных значений от экспериментальных (рис. 3). В итоге результатом такого подбора является установление (выдача) значений Q_0 , k_1 и k_2 для каждой конкретной температуры эксперимента (табл. 1). Нахождение

значений коэффициентов k_1 и k_2 по интегральному уравнению или по зависимости удельной скорости реакции от степени превращения приводит к одним и тем же результатам. Установленные температурные зависимости констант скоростей представлены в виде $k_1 = 10^{11.5 \pm 0.7} \exp[(-167.9 \pm \pm 6.9) \cdot 10^3 / RT]$, с^{-1} , $k_2 = 10^{13.5 \pm 0.4} \exp[(-172.6 \pm \pm 3.5) \cdot 10^3 / RT]$, с^{-1} , $R = 8.314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}$.

Кинетические закономерности тепловыделения при разложении **Az(O)All**

На рис. 4 приведены результаты по кинетике реакции термического разложения **Az(O)All**, полученные методами ТГ и ДСК. На кривой ДСК наблюдаются три пика – эндотермический и два экзотермических. Первый из них при температуре 125.5 °C отвечает плавлению соединения, теплота этого процесса равна –47.13 Дж/г. Экзотермические пики на кривой ДСК и соответствующие потери массы отвечают процессу термического разложения. Первый экзотермический пик наблюдается при температуре 248.7 °C, соответствующий ему тепловой эффект составляет 863.4 Дж/г. Второй, меньший по теплоте разложения, пик тепловыделения отмечается при температуре 326 °C. При нагревании до 450 °C потеря массы составила ~53%. Таким образом, в процессе разложения **Az(O)All** при высоких температурах в условиях открытой проточной системы образуется около 47% конденсированного продукта реакции. Этим соединение **Az(O)All** отличается от **AzAll**, в случае которого потеря массы близка к 100% за счет образования газообразных продуктов и испарения исходного **AzAll**.

Термическое превращение соединения **Az(O)All** в изотермических условиях в закрытой системе в отличие от **AzAll** протекает по более сложному кинетическому закону. Уже в низкотемпературной области 130–170 °C наблюдается экзотермическая

Таблица 1. Значения констант скоростей реакций термического превращения **AzAll** и **Az(O)All**

Параметры	Значения параметров					
AzAll						
T , °C	230.4	235.4	241.0	251.7		
$k_1 \cdot 10^6$, с ⁻¹	1.2	1.8	2.5	6.2		
$k_2 \cdot 10^5$, с ⁻¹	3.8	5.8	9.3	20		
Az(O)All						
T , °C	129.5	136.1	142.3	150.0	170.2	180.6
$k_1 \cdot 10^5$, с ⁻¹	1.9	2.6	3.8	5.8	19	23
T , °C	174.8	180.6	185.2	190.0	199.6	209.4
$k_2 \cdot 10^5$, с ⁻¹	0.72	1.2	2.4	3.1	8.8	19
$k_3 \cdot 10^5$, с ⁻¹	—	5.8	9.3	12	27	65

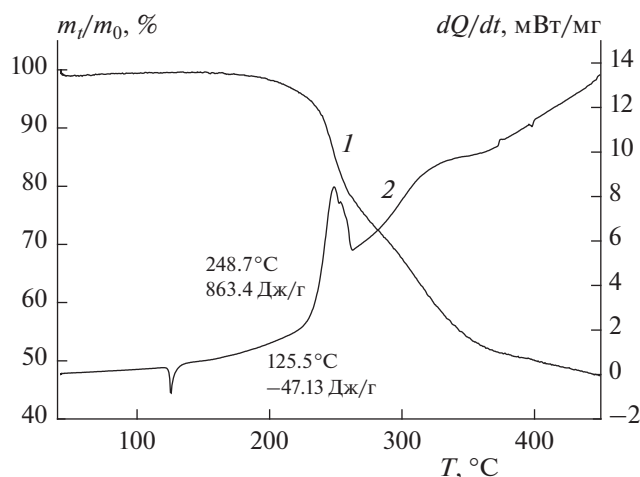


Рис. 4. Кривые ТГ (1) и ДСК (2) при термическом разложении $\text{Az}(\text{O})\text{All}$. Масса навески ~ 2 мг, скорость нагрева — 5 К/мин, скорость продувки аргоном — 40 мл/мин.

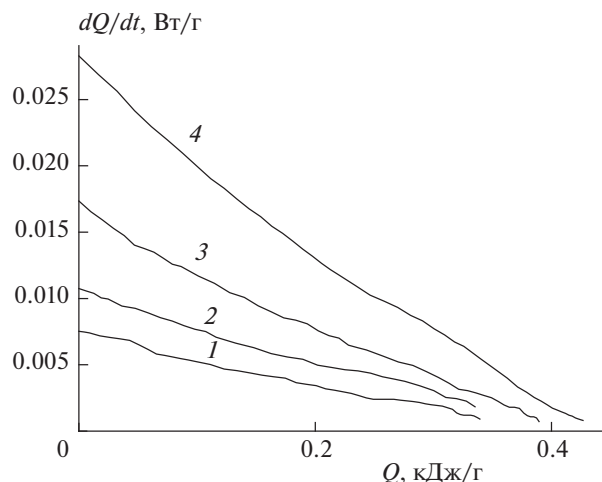


Рис. 5. Зависимость скорости тепловыделения dQ/dt от количества тепла Q , выделившегося к данному моменту времени, при термическом разложении соединения $\text{Az}(\text{O})\text{All}$ при различных температурах: 1 — 129.0; 2 — 136.3; 3 — 142.4; 4 — 150.0°C.

реакция, протекающая в первом приближении по закону реакции первого порядка (рис. 5). Тепловой эффект реакции первого порядка, $Q_{1,0}$, составляет примерно 0.45 кДж/г.

Как видно из рис. 5, некоторое отклонение кривых зависимости скорости тепловыделения от текущей теплоты процесса от линейного закона, который должен выполняться в случае реакции первого порядка, наблюдается в большей степени на больших глубинах разложения, при которых скорость тепловыделения в реакции разложения определяется с большей относительной ошибкой вследствие малых абсолютных величин самих скоростей тепловыделения.

Величины констант скоростей реакции первого порядка k_1 (табл. 1) находили аналогично с использованием программы Origin методом подбора значений $Q_{1,0}$, и k_1 при построении расчетной кривой зависимости текущей теплоты процесса Q_t от времени, задаваемой интегральным уравнением реакции первого порядка (рис. 6):

$$Q_t = Q_{1,0}[1 - \exp(-k_1 t)], \quad (2)$$

с минимальным отклонением расчетных значений от экспериментальных.

Найденная температурная зависимость константы скорости реакции первого порядка (в с^{-1}) представлена в виде

$$k = 10^{5.1 \pm 0.3} \exp\{(-76.0 \pm 2.7) \cdot 10^3 / RT\}.$$

Можно предположить, что данная реакция представляет собой термически инициированную полимеризацию по двойным связям аллильной группы. Для инициирования реакции полимеризации по аллильной группе необходимо термически инду-

цированное зарождение в реагирующей системе свободных радикалов. В данном случае реакцией зарождения цепи может быть раскрытие фурансановых циклов по связи N—O с образованием бирадикальных фрагментов. Раскрытие фурансановых циклов протекает с большими скоростями по сравнению со скоростью раскрытия фуразановых циклов, и уже в относительно низком интервале температур концентрация образующихся бирадикальных фрагментов достаточна, чтобы

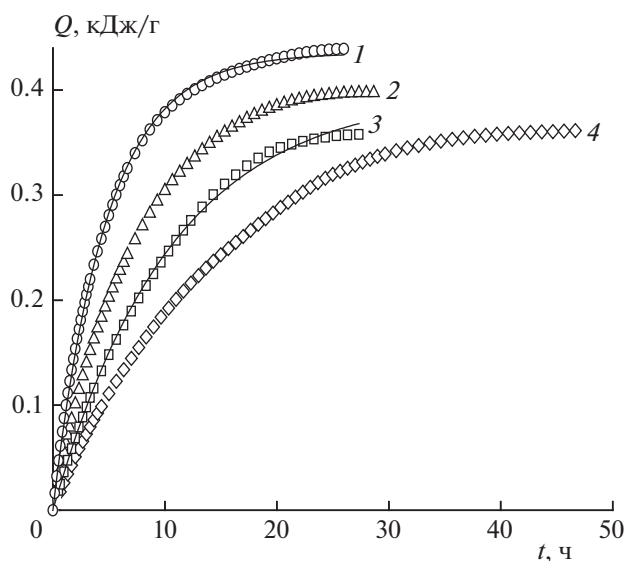


Рис. 6. Кинетические зависимости тепла Q_t , выделившегося при разложении соединения $\text{Az}(\text{O})\text{All}$, от времени t при различных температурах: 1 — 129.0; 2 — 136.3; 3 — 142.4; 4 — 150.0°C. Точки — эксперимент, сплошные кривые — расчет по уравнению (2).

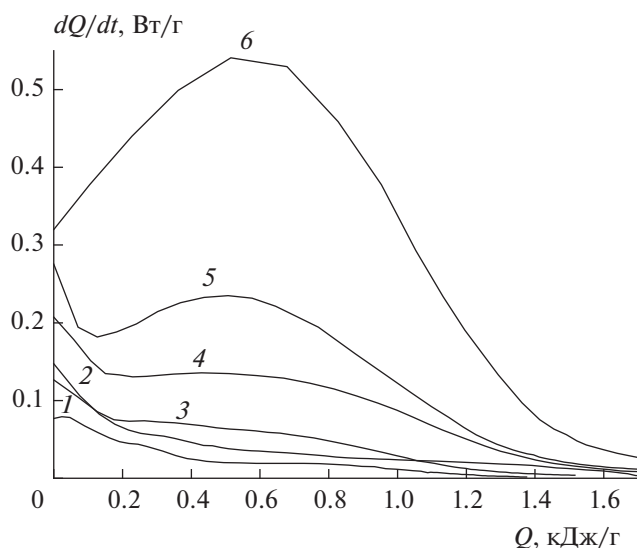


Рис. 7. Зависимость скорости тепловыделения dQ/dt от количества тепла, выделившегося к данному моменту времени Q , при разложении **Az(O)All** при различных температурах: 1 – 174.3; 2 – 180; 3 – 185; 4 – 190; 5 – 199; 6 – 209 °C.

инициировать наблюдаемую реакцию полимеризации **Az(O)All**. Раскрытие фуразановых циклов в случае **AzAll** также протекает, но в существенно более высоком интервале температур, при которых возмозная реакция полимеризации, вероятно, успевает закончиться за время прогрева ампулы с веществом в калориметре и поэтому она не фиксируется на микрокалориметре. После прогрева ампулы до температуры термостата регистрируется уже скорость реакции термического разложения продукта полимеризации **AzAll** по двойной связи.

С дальнейшим повышением температуры кривая скорости тепловыделения усложняется, процесс описывается суммой двух параллельных реакций: реакции первого порядка и автокаталитической реакции первого порядка (рис. 7). В этом случае зависимость скорости тепловыделения от глубины разложения описывается уравнением

$$dQ/dt = Q_{1,0}k_1(1 - \eta_1) + Q_{2,0}k_3(1 - \eta_2)(\eta_2 + k_2/k_3),$$

где $\eta_1 = Q_{1,t}/Q_{1,0}$ – глубина реакции полимеризации 1-го порядка, $Q_{2,0}$ – полный тепловой эффект автокаталитической реакции 1-го порядка; $\eta_2 = Q_{2,t}/Q_{2,0}$ – глубина автокаталитической реакции разложения 1-го порядка; $k_2, \text{с}^{-1}$ – константа скорости некаталитической стадии разложения; $k_3, \text{с}^{-1}$ – константа скорости каталитической стадии разложения.

При температуре 209 °C и выше реакция полимеризации **Az(O)All** по двойной связи так же, как и в случае **AzAll**, вероятно, успевает закончиться за время прогрева ампулы в калориметре, и затем

фиксируется только автокаталитическая реакция термического разложения образующегося продукта полимеризации **Az(O)All** по двойной связи.

По разности общей теплоты реакции в этом интервале температур (около 1.65 кДж/г) и теплоты реакции полимеризации найдено, что тепловой эффект параллельной автокаталитической реакции первого порядка при разложении продуктов полимеризации **Az(O)All** составляет примерно 1.2 кДж/г. Суммарная теплота термического превращения **Az(O)All** в закрытой системе в изотермических условиях существенно больше величины 0.86 кДж/г, измеренной в открытой системе в неизотермических условиях (рис. 4). Вероятно, это связано с сублимацией части навески вещества, а также с уносом из реакционной зоны возможного продукта реакции – двуокси азота NO_2 с газом-носителем аргон и уменьшением вклада в суммарную теплоту вторичных экзотермических реакций с участием NO_2 .

Величины констант скоростей автокаталитической реакции разложения k_2 и k_3 (табл. 1) находили аналогичным образом с использованием программы Origin методом подбора значений $Q_{2,0}$, k_2 и k_3 при построении расчетной кривой зависимости текущей теплоты процесса Q_t от времени, задаваемой интегральным уравнением для суммы параллельных реакций: реакции полимеризации первого порядка и автокаталитической реакции разложения первого порядка

$$Q_t = Q_{1,0}[1 - \exp(-k_1t)] + (Q_{2,0}k_2/k_3)\{\exp[(k_2 + k_3)t] - 1\}/\{1 + (k_2/k_3)\exp[(k_2 + k_3)t]\} \quad (3)$$

с минимальным отклонением расчетных значений от экспериментальных (рис. 8).

Варьирование отношения величины массы навески к величине внутреннего объема ампулы m/V примерно в 2.5 раза в процессе исследования разложения соединений **AzAll** и **Az(O)All** не повлияло на величину степени автокатализа. Следовательно, скорость разложения увеличивается по ходу процесса разложения как **AzAll**, так и **Az(O)All** за счет накопления конденсированных продуктов разложения.

Выражения для температурных зависимостей констант скоростей представлены в виде

$$k_2 = 10^{14.8 \pm 0.7} \exp[(-171.4 \pm 6.4) \cdot 10^3/RT], \text{с}^{-1},$$

$$k_3 = 10^{13.0 \pm 0.5} \exp[(-149.7 \pm 5.3) \cdot 10^3/RT], \text{с}^{-1}.$$

Величины константы скорости начальной реакции термического разложения при 210 °C в ряду исследованных производных азепинов **Az(O)All**, **Az(O)NH₂**, **AzAll** соотносятся как 4000 : 10 : 1. За единицу принята константа скорости реакции разложения соединения **AzAll**. Термическое разложение фуроксановых и фуразановых циклов проте-

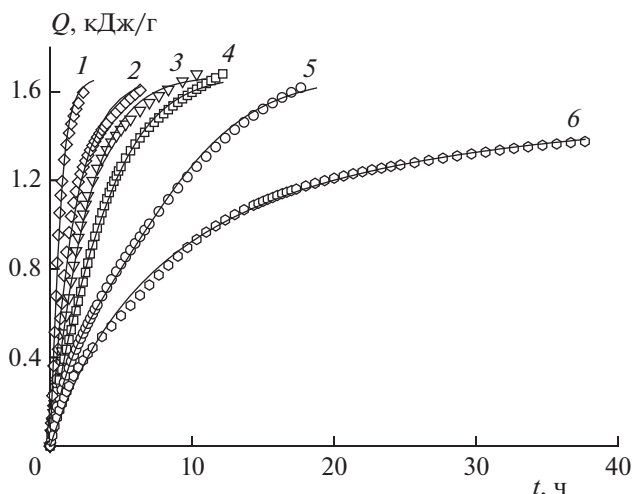


Рис. 8. Кинетические зависимости тепла Q , выделившегося при разложении $\text{Az}(\text{O})\text{All}$, от времени t при различных температурах: 1 — 209; 2 — 199; 3 — 190; 4 — 185; 5 — 180; 6 — 174.3 °C. Точки — эксперимент, сплошные кривые — расчет по уравнению (3).

кает по механизму обратимого ступенчатого распада циклов с образованием бирадикальных переходных состояний [24]. Фуразановые циклы, входящие в состав молекулы AzAll , более термостабильны по сравнению с фуроксановым циклом в составе молекул $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$ и $\text{Az}(\text{O})\text{All}$. Вследствие этого скорости тепловыделения при разложении AzAll фиксировались в изотермических условиях в более высоком интервале температур (230–250 °C) по сравнению с температурами при исследовании $\text{Az}(\text{O})\text{All}$ (175–210 °C). Дополнительно, кроме наличия в молекуле фуроксанового цикла, термическая стабильность $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$ снижается в сравнении с AzAll вследствие имеющейся в составе его молекулы слабой связи N–N.

Наименьшую стабильность среди сравниваемых производных азепинов имеет $\text{Az}(\text{O})\text{All}$, подверженный при относительно низких температурах реакции термически инициированной полимеризации вследствие наличия в составе молекулы кратных связей C=C. Высокая термостабильность AzAll объясняется тем, что в составе молекулы нет фуроксанового цикла.

ВЫВОДЫ

1. Разложение 7-аллил-7H-трифуразано[3,4-b:3',4'-d:3'',4''-f]азепина (AzAll) в температурном интервале 230–250.0 °C протекает с тепловыделением по закону автокаталитической реакции первого порядка. Соединение 7-аллил-7H-дифуразано[3,4-b:3',4'-f]фуроксано[3'',4''-d]азепин ($\text{Az}(\text{O})\text{All}$) в температурном интервале 130–170 °C вступает в реакцию термически инициированной поли-

меризации, а при более высоких температурах 175–210 °C параллельно протекают реакция полимеризации первого порядка и разложение исходного $\text{Az}(\text{O})\text{All}$ по закону автокаталитической реакции первого порядка.

2. Установлено, что наибольшей термической стабильностью среди исследованных производных азепинов обладает соединение AzAll , в состав молекулы которого входят только фуразановые циклы. Термическая стабильность производных азепинов снижается при наличии в составе их молекул менее стабильных фуроксановых циклов (у $\text{Az}(\text{O})\text{All}$ и $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$) и слабой связи N–N (у $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$). Наименьшую термостабильность имеет соединение $\text{Az}(\text{O})\text{All}$, которое при относительно низких температурах подвергается реакции термически инициированной полимеризации. Величины константы скорости начальной реакции термического превращения при 210 °C в ряду исследованных производных азепинов $\text{Az}(\text{O})\text{All}$, ($\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$ (разложение), AzAll (разложение) соотносятся как 4000 : 10 : 1.

3. Установлено, что температуры плавления и теплоты плавления для соединений AzAll и $\text{Az}(\text{O})\text{All}$ составляют 117.3 °C, –65.38 Дж/г и 125.5 °C, –47.13 Дж/г соответственно.

Работа выполнена по темам госзадания № АААА-А19-119101690058-9 и № АААА-А19-119120690042-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klapötke T.M. Chemistry of High-Energy Materials. 3rd ed. Berlin: De Gruyter, 2015.
2. Churakov A.M., Ioffe S.L., Tartakovsky V.A. // Mendeleev Commun. 1995. V. 5. № 6. P. 227; <https://doi.org/10.1070/MC1995v005n06ABEH000539>
3. Klenov M.S., Guskov A.A., Anikin O.V. et al. // Angew. Chem. Intern. Ed. 2016. V. 55. № 38. P. 11472; <https://doi.org/10.1002/anie.201605611>
4. Sheremetev A.B., Kulagina V.O., Aleksandrova N.S. et al. // Propellants Explos. Pyrotech. 1998. V. 23. P. 142.
5. Chavez D.E. // Topics in Heterocyclic Chemistry (Eds. Larionov O.V.). Berlin: Springer, 2017. V. 53. P. 1; https://doi.org/10.1007/7081_2017_5
6. Churakov A.M., Ioffe S.L., Tartakovsky V.A. // Mendeleev Commun. 1996. V. 6. № 1. P. 20; <https://doi.org/10.1070/MC1996v006n01ABEH000560>
7. Wei H., Gao H., Shreeve J.M. // Chem. Eur. J. 2014. V. 20. № 51. P. 16943; <https://doi.org/10.1002/chem.201405122>
8. Chavez D.E., Parrish D.A., Mitchell L., Imler G.H. // Angew. Chem. Intern. Ed. 2017. V. 56. № 13. P. 3575; <https://doi.org/10.1002/anie.201612496>
9. Наур У.Р., Сибавалан Р., Гор Г.М. и др. // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 2. С. 3.
10. Захаров В.В., Чуканов Н.В., Шилов Г.В. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 7. С. 35; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21070128>

11. Xia C., Zheng C., Zhang T. *et al.* // Chin. J. Energetic Mater. 2015. V. 23. № 11. P. 1089;
<https://doi.org/10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.010>
12. Zhang J., Zhou J., Bi F., Wang B. // Chin. Chem. Lett. 2020. V. 31. № 9 P. 2375;
<https://doi.org/10.1016/j.cclet.2020.01.026>
13. Степанов А.И., Астрат'ев А.А., Дашко Д.В. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 5. С. 1019.
14. Astrat'ev A.A., Dashko D.V., Stepanov A.I. // Cent. Eur. J. Chem. 2012. V. 10. № 4. P. 1087;
<https://doi.org/10.2478/s11532-012-0020-7>
15. Stepanov A.I., Dashko D.V., Astrat'ev A.A. // Cent. Eur. J. Energetic Mater. 2012. V. 9. № 4. P. 329.
16. Гончаров Т.К., Алиев З.Г., Алдошин С.М. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 2. С. 366;
<https://doi.org/10.1007/s11172-015-0870-1>
17. Яновский Л.С., Лемперт Д.Б., Разносчиков В.В., Аверьков И.С. // Журн. прикл. химии 2019. Т. 92. № 3. С. 322;
<https://doi.org/10.1134/S0044461819030071>
18. Лемперт Д.Б., Игнат'ева Е.Л., Степанов А.И. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 2. С. 3.
19. Казаков А.И., Лемперт Д.Б., Набатова А.В. и др. // Журн. прикл. химии. 2019. Т. 92. № S13. С. 1657;
<https://doi.org/10.1134/S0044461819130036>
20. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 52;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20090149>
21. Гудкова И.Ю., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 53;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20030061>
22. Сорокин В.А., Яновский Л.С., Арефьев К.Ю. и др. Прямоточные воздушно-реактивные двигатели на энергоемких конденсированных материалах. М.: ЦИАМ, 2020.
23. Гальперин Л.Н., Колесов Ю.Р., Машинов Л.Б., Тернер Ю.Э. // Труды шестой Всесоюзной конференции по калориметрии. Тбилиси: Мецниереба, 1973. С. 539.
24. Манелис Г.Б., Назин Г.М., Рубцов Ю.И., Струнин В.А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. М.: Наука, 1996.