

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ
ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ, КАТАЛИЗ

УДК 541.124:547.235.5:547.772.1

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА N-ЦИАНОМЕТИЛЬНЫХ
ПРОИЗВОДНЫХ 7-ДИФУРАЗАНОФУРОКСАНОАЗЕПИНА
И 7-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 06.06.2022;

после доработки 10.06.2022;

принята в печать 20.06.2022

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

Ключевые слова: 7H-дифуразанофуроксаноазепин, 7H-трифуразаноазепин, N-цианометильные производные азапинов, термический распад, кинетика.

DOI: 10.31857/S0207401X23090030, EDN: WTIVXX

ВВЕДЕНИЕ

Значительным прогрессом за последнее время в области применения высокоэнтальпийных полиазотистых соединений, содержащих фуразановые, фуросановые и азапиновые N-гетероциклы [1–7], было предложение по их использованию в качестве диспергаторов для газогенераторных двигателей. В качестве возможных диспергаторов рассматривался и ряд других соединений [8–12], но они были исключены из дальнейшего рассмотрения вследствие либо низкой термической стабильности, либо высокой чувствительности к механическим воздействиям или высокозатратного синтеза. Баллистическая эффективность топлив для газогенераторных двигателей в высокой степени пропорциональна объемной низшей теплоте сгорания Q_v^{low} в воздухе топливной композиции, для которой расчетная величина температуры адиабатического превращения в газогенераторе в отсутствие воздуха составляет 1500 К. Применение таких диспергаторов, как 7-амино-7H-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3",4"-*d*]азепин ($Az(O)NH_2$), 7-аллил-7H-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3",4"-*d*]азепин ($Az(O)All$), 7-аллил-7H-трифуразано[3,4-*b*:3',4'-*d*:3",4"-*f*]азепин ($AzAll$), 7-цианометил-7H-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3",4"-*d*]азепин

($Az(O)CH_2CN$), 7-цианометил-7H-трифуразано[3,4-*b*:3',4'-*d*:3",4"-*f*]азепин ($AzCH_2CN$) (табл. 1) и некоторых других позволило на 17–18% поднять дальность полета по сравнению с топливами, содержащими перхлорат аммония (ПХА) в качестве диспергатора [1, 3, 8]. Бинарные композиции этих компонентов с изопреновым каучуком СКИ-3 способны обеспечить достижение величин $Q_v^{low} \sim 33$ МДж/л для рецептур, температуры адиабатического превращения которых находятся на уровне 1500 К.

Одним из наиболее перспективных диспергаторов из класса высокоэнтальпийных N-гетероциклов сегодня считается $Az(O)NH_2$ [4]. Было решено синтезировать диспергаторы на основе производных 7H-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3",4"-*d*]азепина и 7H-трифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*:3",4"-*d*]азепина, заменив в них атом водорода на группы, одновременно повышающие энтальпию образования и теплоту сгорания целевого соединения, в частности, на аллильную, содержащую двойную связь, и цианометильную группу.

Была исследована кристаллическая структура синтезированных соединений, определена их экспериментальная энтальпия образования, и на основе этих данных оценена их эффективность в

Таблица 1. Аминные и алкильные производные 7*H*-дифуразанофуроксаноазепина и 7*H*-трифуразаноазепина

Az(O)NH ₂	Az(O)All	AzAll	Az(O)CH ₂ CN	AzCH ₂ CN

качестве диспергаторов в газогенераторных двигателях [1, 3]. Установлено, что бинарные композиции на основе **AzAll**, **Az(O)All**, **Az(O)CH₂CN** и **AzCH₂CN** и каучука СКИ-3 могут обеспечить уровень дальности полета 98,6, 101, 101 и 103% соответственно от величины, которую обеспечивает соединение **Az(O)NH₂** с СКИ-3 [1, 3].

Видно, что четыре диспергатора твердых топлив (**AzAll**, **Az(O)All**, **Az(O)CH₂CN** и **AzCH₂CN**) проявляют баллистическую эффективность, близкую к **Az(O)NH₂**. Топлива для газогенераторных двигателей, в отличие от СТРТ, эксплуатируются при существенно более высоких температурах, поэтому при близости величин баллистической эффективности диспергаторов выбор одного из них для целевого применения определяется в большей степени его термической стабильностью. В работах [2, 4] изучена кинетика тепловыделения в реакциях термического разложения соединений **Az(O)NH₂**, **Az(O)All** и **AzAll** и проанализирована связь термической стабильности исследуемых соединений со строением их молекул. Настоящая работа посвящена изучению кинетики термического разложения **AzCH₂CN** и **Az(O)CH₂CN**.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения **AzCH₂CN** и **Az(O)CH₂CN** 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 цианметилом. Высокая чистота продуктов подтверждается результатами элементного анализа и данными ЯМР-спектроскопии [3].

Исследование кинетики тепловыделения при термическом превращении образцов **AzCH₂CN** и **Az(O)CH₂CN** в изотермических условиях проводили на автоматическом дифференциальном микрокалориметре ДАК-1-2 [13] 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 исследуемых образцов в неизотермическом режиме изучали методами термогравиметрий (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, и платина/платинородиевый S-образный держатель образца. 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 $AzCH_2CN$

На рис. 1 представлены результаты по кинетике термического разложения $AzCH_2CN$, полученные методами ТГ и ДСК. На кривой ДСК при разложении $AzCH_2CN$ наблюдаются три эндотермических пика. До плавления наблюдается полиморфный переход при температуре 152.2°C с теплотой, составляющей -8.2 Дж/г. Второй эндотермический пик при температуре 179.6°C отвечает плавлению соединения, теплота процесса составляет -73.75 Дж/г. Далее с ростом температуры наблюдается только начало экзотермического разложения с максимальной скоростью тепловыделения при 274.6°C , затем наблюдается третий эндотермический пик при температуре 320.95°C , соответствующий испарению образца с суммарным эндотермическим эффектом, равным -570.2 Дж/г. Общая потеря массы при достижении температуры 330°C составила $\sim 98.13\%$.

Для получения данных, необходимых для расчета глубины разложения исследуемого соединения как функции температуры и времени, было проведено изучение кинетики реакции в изотермических условиях с определением закона зависимости скорости реакции от глубины разложения и зависимости кинетических констант от температуры. Полученные экспериментальные кривые зависимости скоростей тепловыделения при разложении соединения $AzCH_2CN$ в интервале температур $250\text{--}290.0^\circ\text{C}$ в изотермических условиях представлены на рис. 2.

Полный тепловой эффект реакции термического разложения $AzCH_2CN$ в изотермических экспериментах в запаянных ампулах составляет около 3 кДж/г. Форма кривых зависимости скорости тепловыделения от текущей теплоты реакции с максимумом скорости при глубине разложения $\approx 33\%$ (рис. 2) может свидетельствовать о протекании процесса разложения по закону автокаталитической реакции второго порядка по исходному веществу и первого порядка по продукту реакции:

$$d\eta/dt = k_1(1-\eta)^2 + k_2(1-\eta)^2\eta, \quad (1)$$

где $k_1, \text{с}^{-1}$ — константа скорости некаталитической реакции; $k_2, \text{с}^{-1}$ — константа скорости каталитической реакции. В координатах $(d\eta/dt)/(1-\eta)^2 - \eta$ на рис. 3 представлены линейные зависимости величины $(d\eta/dt)/(1-\eta)^2$ от глубины разложения при исследованных температурах, по которым из величин отрезков, отсекаемых на оси ординат, и из величин тангенсов углов наклона найдены соответствующие значения коэффициентов k_1 и k_2 (табл. 2). Установленные температурные зависимости констант скоростей представлены в виде

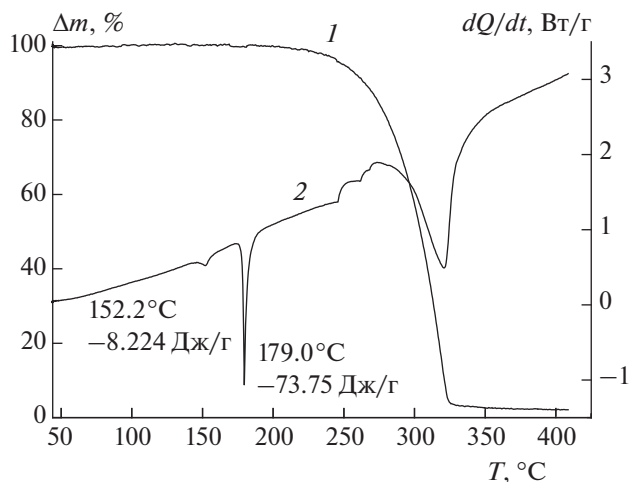


Рис. 1. Кривые ТГ (1) и ДСК (2) при термическом разложении $AzCH_2CN$. Масса навески ~ 2 мг, скорость нагрева — 5 К/мин, скорость продувки аргоном — 40 мл/мин.

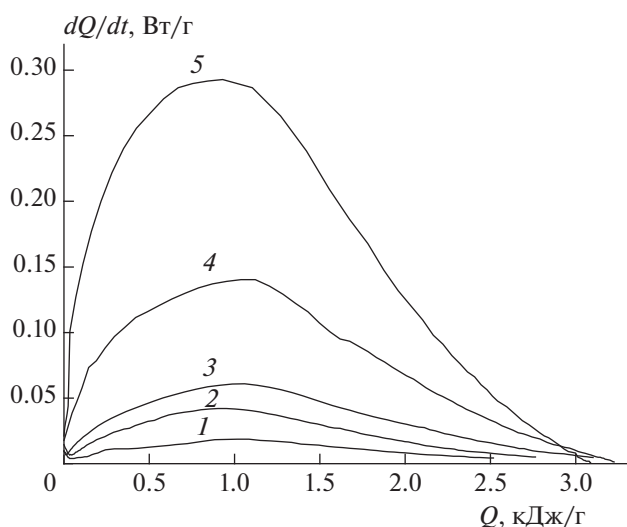


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения dQ/dt от количества тепла Q , выделившегося к данному моменту времени при разложении $AzCH_2CN$ при различных температурах: 1 — 250.3°C ; 2 — 260.3°C ; 3 — 264.7°C ; 4 — 281.5°C ; 5 — 290.0°C .

$$k_1 = 10^{21.6 \pm 0.5} \exp[(-280.6 \pm 5.2) \cdot 10^3/RT], \text{с}^{-1}, k_2 = 10^{6.5 \pm 0.9} \exp[(-107.3 \pm 9.8) \cdot 10^3/RT], \text{с}^{-1}, R = 8.314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

Кинетические закономерности тепловыделения при разложении $Az(O)CH_2CN$

На рис. 4 приведены результаты по кинетике реакции термического превращения $Az(O)CH_2CN$, полученные методами ТГ и ДСК. На кривой ДСК наблюдаются три пика — эндотермический и два

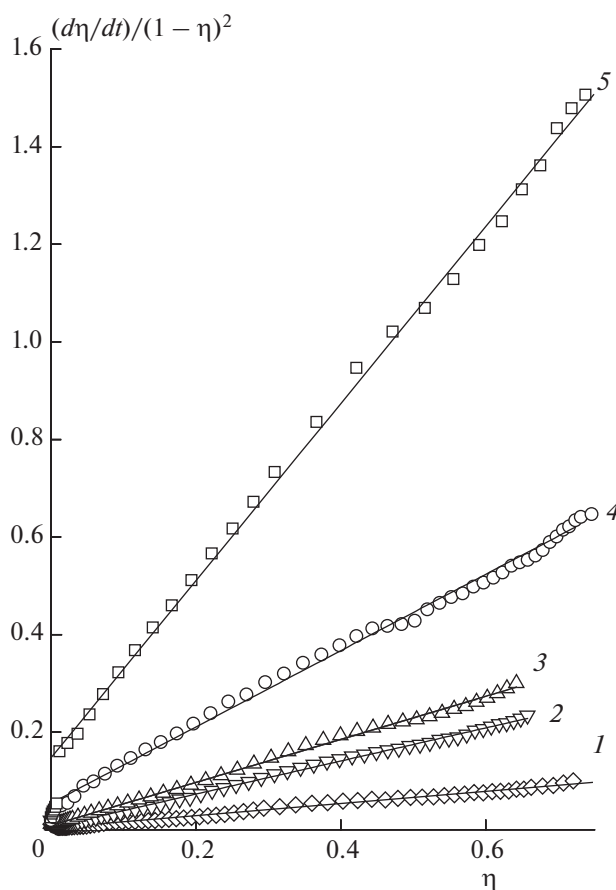


Рис. 3. Зависимость величины $(d\eta/dt)/(1-\eta)^2$ от глубины превращения η при разложении AzCH_2CN при различных температурах: 1 – 250.3; 2 – 260.3; 3 – 264.7; 4 – 281.5; 5 – 290.0 °C.

экзотермических. Первый из них при температуре 196.3 °C отвечает плавлению соединения, теплота этого процесса равна –70.98 Дж/г. Экзотермические пики на кривой ДСК и соответствующие потери массы отвечают процессу термического разложения. Первый экзотермический пик наблюдается при температуре 302.6 °C, соответствующий ему тепловой эффект составляет 545.3 Дж/г.

Второй пик тепловыделения с теплотой разложения в 354.3 Дж/г отмечается при температуре 355.4 °C. При нагревании до 450 °C потеря массы составила ~76.77%. Таким образом, в процессе разложения $\text{Az(O)CH}_2\text{CN}$ при высоких температурах в условиях открытой проточной системы образуется около 23.23% конденсированного продукта реакции. Этим соединением $\text{Az(O)CH}_2\text{CN}$ отличается

Таблица 2. Значения константы скорости реакций термического разложения AzCH_2CN и $\text{Az(O)CH}_2\text{CN}$

Параметры	Значения параметров					
	AzCH_2CN					
$T, ^\circ\text{C}$	250.3	260.3	264.7	281.5	290	
$k_1 \cdot 10^6, \text{c}^{-1}$	0.46	1.4	2.4	15	41	
$k_2 \cdot 10^5, \text{c}^{-1}$	6.3	9.4	12	22	37	
$\text{Az(O)CH}_2\text{CN}$						
$T, ^\circ\text{C}$	210	219.3	230.4	241.0	250.3	260.3
$k_1 \cdot 10^6, \text{c}^{-1}$	4.1	7.0	14	42	73	160
$k_2 \cdot 10^5, \text{c}^{-1}$	4.6	10	22	44	67	120

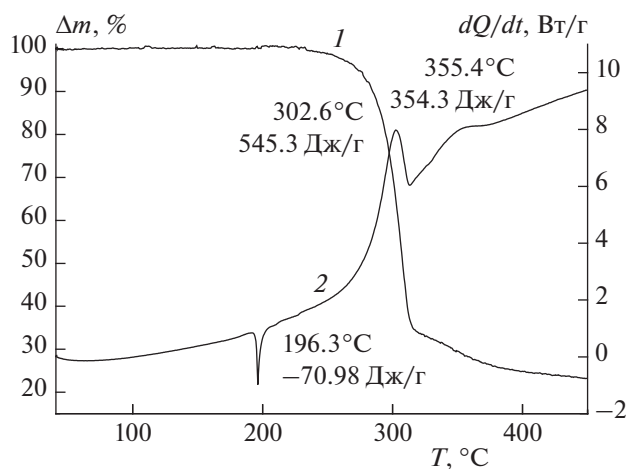


Рис. 4. Кривые ТГ (1) и ДСК (2) при термическом разложении $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$. Масса навески ~2 мг, скорость нагрева — 5 К/мин, скорость продувки аргоном — 40 мл/мин.

ся от AzCH_2CN , в случае которого потеря массы близка к 100% за счет образования газообразных продуктов и испарения исходного AzCH_2CN .

В отличие от $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$, который разлагается в твердой фазе без предварительного плавления, AzCH_2CN и $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ разлагаются с заметными скоростями, перейдя в жидкую фазу. Термическое превращение $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ в изотермических условиях в закрытой системе протекает, как

и в случае $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$, по кинетическому закону автокаталитической реакции первого порядка:

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

где k_1 , с^{-1} — константа скорости некаталитической реакции; k_2 , с^{-1} — константа скорости каталитической реакции.

Об этом свидетельствует форма кривых зависимости скорости тепловыделения от текущей теплоты реакции с максимумом скорости при глубине разложения $\approx 50\%$ (рис. 5) и выполнение линейных зависимостей удельных скоростей реакции от глубины разложения до больших глубин разложения (рис. 6).

Выражения для температурных зависимостей констант скоростей k_1 и k_2 , (в с^{-1}) найденных по величинам отрезков, отсекаемым на оси ординат, и по величинам тангенсов углов наклона прямых соответственно при различных температурах (рис. 6), представлены в виде

$$k_1 = 10^{11.7 \pm 0.8} \exp\left[(-158.5 \pm 8.1) \cdot 10^3 / RT\right],$$

$$k_2 = 10^{10.6 \pm 0.6} \exp\left[(-137.3 \pm 6.0) \cdot 10^3 / RT\right].$$

Варьирование отношения величины массы навески к величине внутреннего объема ампулы m/V примерно в 2.5 раза в процессе исследования разложения соединений AzCH_2CN и $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ не повлияло на величину степени автокатализа. Следовательно, скорость разложения увеличивается по ходу процесса разложения как AzCH_2CN ,

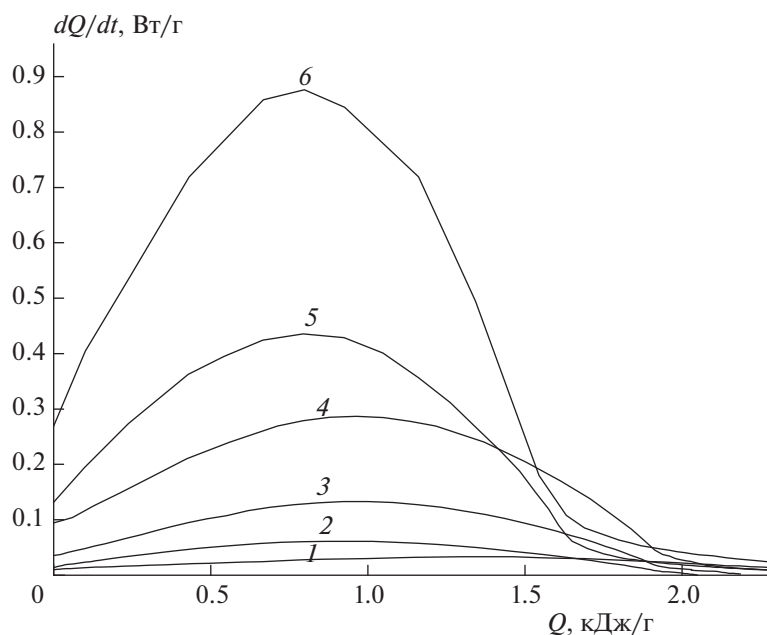


Рис. 5. Зависимость скорости тепловыделения dQ/dt от количества тепла Q , выделившегося к данному моменту времени при разложении $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ при различных температурах: 1 — 210.0; 2 — 219.3; 3 — 230.4; 4 — 241.0; 5 — 250.3; 6 — 260.3°C.

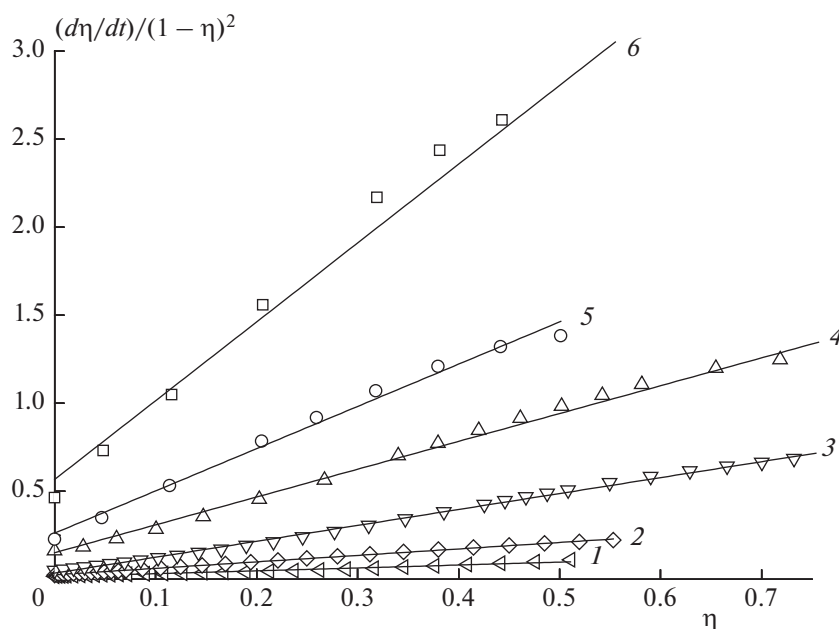
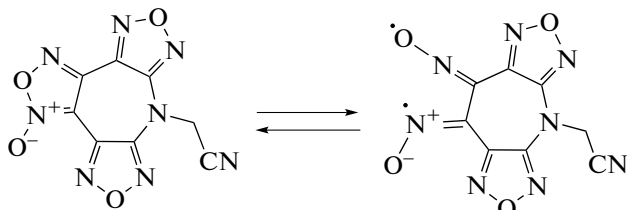


Рис. 6. Зависимость удельной скорости реакции термического разложения $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ от глубины превращения при различных температурах: 1 — 210.0; 2 — 219.3; 3 — 230.4; 4 — 241.0; 5 — 250.3; 6 — 260.3 °C.

так и $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ за счет накопления конденсированных продуктов разложения.

Температуры в изотермических экспериментах, при которых на микрокалориметре наблюдались измеримые скорости реакции при разложении $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ (210.0–260.3 °C), были существенно меньше соответствующих температур при разложении AzCH_2CN (250.3–290.0 °C). Данные неізотермических измерений ДТА по температурам начала интенсивного разложения, составляющие 301 и 335 °C для соединений $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ и AzCH_2CN соответственно, также подтверждают более низкую термостабильность $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ по сравнению с AzCH_2CN . Более низкая термостабильность $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ связана с наличием в его молекуле фуроксанового цикла, который менее термостоек по сравнению с фуразановыми циклами. Фуроксановые циклы, как и фуразановые, подвержены обратимому ступенчатому циклораспаду с образованием бирадикального переходного состояния [14].



Согласно масс-спектрометрическим данным основными конечными газообразными продуктами разложения $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ и AzCH_2CN явля-

ются формальдегид CH_2O (30), N_2 (28), NO (30), CO (28), N_2O (44), CO_2 (44), HCN (27), $(\text{CN})_2$ (52), HCNO (43). Суммарная теплота разложения как $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$, так и AzCH_2CN , измеренная в неизотермических условиях, существенно меньше аналогичных величин, полученных в изотермических условиях, (например, в случае $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ различие составляет примерно два раза) что, вероятно, связано с уносом из реакционной зоны продукта реакции — двуокиси азота NO_2 с газом-носителем аргоном и уменьшением вклада вторичных экзотермических реакций с участием NO_2 в суммарную теплоту. Масс-спектрометрическим методом установлено, что молекула NO_2 появляется и исчезает в области температур вблизи первого экзотермического пика разложения $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$ (рис. 4).

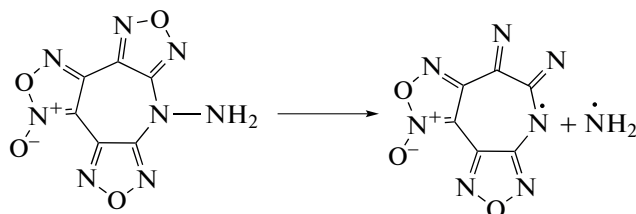
Величины константы скорости начальной реакции термического превращения при 250 °C в ряду исследованных цианометильных и ранее исследованных аллильных производных азепинов $\text{Az}(\text{O})\text{All}$, $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$, $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$, AzAll , AzCH_2CN соотносятся как $7 \cdot 10^4 : 1.6 \cdot 10^2 : 7 \cdot 10^1 : 1.3 \cdot 10^1 : 1$. За единицу принята константа скорости реакции разложения соединения AzCH_2CN . В табл. 3 представлены времена достижения 1%-ной глубины разложения исследуемых соединений при 250 °C.

Фуразановые циклы, входящие в состав молекул AzCH_2CN и AzAll , должны быть более термостабильными по сравнению с фуроксановыми циклами [14] в составе молекул $\text{Az}(\text{O})\text{NH}_2$, $\text{Az}(\text{O})\text{CH}_2\text{CN}$

Таблица 3. Время достижения 1%-ной глубины разложения исследуемых соединений при 250°C

Соединение	Время
Az(O)All	3.2 с
Az(O)CH ₂ CN	2.3 мин
Az(O)NH ₂	5 мин
AzAll	27 мин
AzCH ₂ CN	6.2 ч

и **Az(O)All**. Наблюдаемая относительно более высокая термостабильность **Az(O)NH₂** по сравнению с термостабильностью **Az(O)CH₂CN** связана с тем, что соединение **Az(O)NH₂**, в отличие от всех исследованных азепинов, разлагается без предварительного плавления в твердой фазе. Тормозящий разложение эффект кристаллической решетки [15], количественно выражающийся отношением констант скоростей разложения соединения в жидкой и твердой фазе, должен приводить к увеличению термостабильности **Az(O)NH₂**. Однако отношение константы скорости разложения **Az(O)CH₂CN** в расплаве к константе скорости **Az(O)NH₂** в твердой фазе составляет примерно один порядок, что меньше предельной величины тормозящего эффекта, составляющей $\sim 10^2$ [15]. Наблюдаемое отношение констант скоростей может быть объяснено, исходя из особенностей связи N—N, имеющейся в молекуле **Az(O)NH₂**. Вследствие отталкивания *p*-орбиталей соседних атомов азота длина одинарной связи между атомами азота (1.40 Å) больше суммы ковалентных радиусов атомов азота ($2 \times 0.53 = 1.06$ Å). В итоге связь N—N характеризуется очень низкой энергией диссоциации (151.8 кДж/моль) по сравнению с другими видами связей в органических соединениях, в том числе и с энергией связи C—N (272.0 кДж/моль) азепинового цикла с нитрильным фрагментом в **Az(O)CH₂CN** и **AzCH₂CN**. Наблюдаемая энергия активации некаталитической реакции разложения **Az(O)NH₂** (141.8 кДж/моль) [4] близка к величине энергии связи N—N. В данном случае начальная реакция разложения протекает с образованием азепенильного радикала и радикала NH₂:



Наименьшую стабильность среди сравниваемых производных азепинов имеет соединение **Az(O)All**, содержащее кратные связи C=C, и при относительно низких температурах вступающее в

реакцию термически инициированной полимеризации вследствие образования бирадикалов при раскрытии фуроксанового цикла. Высокая термостабильность второго аллильного производного азепина — **AzAll** объясняется тем, что в этом соединении концентрация бирадикальных фрагментов при относительно низких температурах недостаточна для инициирования процесса полимеризации вследствие более высокой термостабильности фуразановых циклов, и, вероятно, данный процесс протекает только в области высоких температур с последующим разложением продукта полимеризации **AzAll** по двойным связям.

ВЫВОДЫ

1. Разложение 7-цианометил-7*H*-трифуразано[3,4-*b*:3',4'-*d*:3'',4''-*f*]азепин (**AzCH₂CN**) в температурном интервале 250–290.0°C протекает с тепловыделением по закону автокаталитической реакции второго порядка по исходному веществу и первого порядка по продукту реакции. Менее термостабильный 7-цианометил-7*H*-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3'',4''-*d*]азепин (**Az(O)CH₂CN**) разлагается с тепловыделением по закону автокаталитической реакции первого порядка в температурном интервале 210–260°C.

2. Величины константы скорости начальных стадий термического превращения при 250°C цианометильных и ранее исследованных аллильных производных азепинов в ряду **Az(O)All**, **Az(O)CH₂CN**, **Az(O)NH₂**, **AzAll**, **AzCH₂CN** соотносятся как $7 \cdot 10^4 : 1.6 \cdot 10^2 : 7 \cdot 10^1 : 1.3 \cdot 10^1 : 1$. Термостабильность производных азепинов определяется наличием или отсутствием в их составе фуроксановых циклов, наличием связи N—N азепинового цикла с заместителем, наличием кратных связей в заместителе и фазовым состоянием соединения, в котором протекает разложение.

3. Установлено, что температуры плавления и теплоты плавления для соединений **AzCH₂CN** и **Az(O)CH₂CN** составляют 179.6°C, –73.75 Дж/г и 196.3°C, –70.98 Дж/г соответственно.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лемперт Д.Б., Игнатъева Е.Л., Степанов А.И. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 2. С. 3.
2. Казаков А.И., Лемперт Д.Б., Набатова А.В. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 5. С. 3.
3. Лемперт Д.Б., Игнатъева Е.Л., Степанов А.И. и др. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 5. С. 11.
4. 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>

5. Жолудев А.Ф., Кислов М.Б., Аверьков И.С. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2021. № 4. С. 685.
6. 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>
7. Лемперт Д.Б., Разносчиков В.В., Яновский Л.С. // Журн. прикл. химии. 2019. Т. 92. № 12. С. 1577; <https://doi.org/10.1134/S0044461819120089>
8. Лемперт Д.Б., Чапышев С.В., Казаков А.И. и др. // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 1. С. 27; <https://doi.org/10.15372/FGV20190103>
9. Лемперт Д.Б., Казаков А.И., Шереметев А.Б. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2019. № 10. С. 1856.
10. Лемперт Д.Б., Зюзин И.Н., Аверьков И.С., Разносчиков В.В., Яновский Л.С. // Журн. прикл. химии. 2021. Т. 94. № 2. С. 184; <https://doi.org/10.31857/S0044461821020067>
11. Лемперт Д.Б., Казаков А.И., Дорофеев Е.М. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 17.
12. Яновский Л.С., Лемперт Д.Б., Разносчиков В.В. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2019. № 10. С. 1848.
13. Гальперин Л.Н., Колесов Ю.Р., Машинов Л.Б., Тернер Ю.Э. // Труды шестой Всесоюз. конф. по калориметрии. Тбилиси: Мецниереба, 1973. С. 539.
14. Манелис Г.Б., Назин Г.М., Рубцов Ю.И., Струнин В.А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. М.: Наука, 1996.
15. Манелис Г.Б., Назин Г.М., Прокудин В.Г. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 7. С. 1417.