

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ
ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ
7-АМИНО-7Н-ДИФУРАЗАНО[3,4-*b*:3',4'-*f*]ФУРОКСАНО[3'',4''-*d*]АЗЕПИНА
И БИНАРНОГО ТОПЛИВА НА ЕГО ОСНОВЕ**

© А. И. Казаков¹, Д. Б. Лемперт¹, А. В. Набатова¹, Д. В. Дашко⁴,
В. В. Разносчиков^{1,2}, Л. С. Яновский^{1,2,3}, С. М. Алдошин^{1,3}

¹ Институт проблем химической физики РАН,
142432, г. Черноголовка Московской обл., пр. Академика Семенова, д. 1

² Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова,
111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 51

⁴ СКТБ «Технолог»,
192076, г. Санкт-Петербург, Советский пр., д. 33-а
E-mail: akazakov@icp.ac.ru

Поступила в Редакцию 8 октября 2019 г.

После доработки 11 октября 2019 г.

Принята к публикации 11 октября 2019 г.

*Изучена кинетика тепловыделения в реакции термического разложения 7-амино-7Н-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3'',4''-*d*]азепина и бинарного топлива на его основе, предлагаемого в качестве потенциального перспективного диспергатора в газогенераторе прямоточных воздушных ракетных двигателей. На основе установленных кинетических закономерностей рассчитано время достижения определенной глубины разложения при заданном наборе температур для решения вопроса о пригодности рассматриваемого топлива для конкретного изделия.*

Ключевые слова: кинетика; тепловыделение; термораспад; твердое топливо; ракетно-прямоточный двигатель; диспергатор

DOI: 10.1134/S0044461819130036

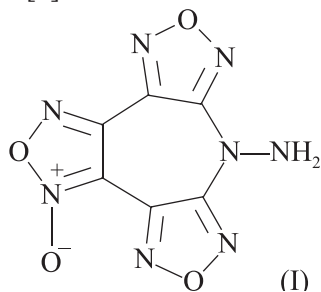
В процессе эксплуатации и хранения энергетические композиции (ракетное топливо, взрывчатые вещества, пороха, самогорящие газогенерирующие составы) подвергаются температурному воздействию. Разброс температур эксплуатации и хранения может быть от -50 до 280°C , а это в свою очередь может приводить к изменению состава композиции за счет протекания экзотермических реакций термического

разложения, а при недостаточном теплоотводе даже к самовоспламенению композиции. Даже частичное разложение компонентов топлива может привести к существенному уменьшению скорости горения и величины удельного импульса топлива. Кроме того, выделение газов, связанное с термическим распадом твердых ракетных топлив, даже при достаточно низкой глубине разложения, практически не влияющей на

энергетику топлива, может привести к значительной пористости полученного отвержденного топлива, что также изменит закон горения, причем неконтролируемым образом. Все перечисленные факторы могут привести к тому, что дальнейшее использование отвержденного топлива станет невозможным. Поэтому для определения условий безопасного и эффективного функционирования топливных составов очень важно знать кинетические характеристики тепловыделения при термическом разложении этих систем.

В публикациях последних лет анализируется возможность повышения энергетической эффективности твердых топлив для прямоточных воздушных ракетных двигателей [1, 2] за счет организации двухстадийного термического превращения топлива: 1-я стадия — газификация в газогенераторе, 2-я стадия — горение диспергированных продуктов в потоке горячего воздуха в камере дожигания. Высокое суммарное тепловыделение на этих двух стадиях определяет в основном дальность полета, но чтобы процесс горения протекал эффективно (с высокими скоростью и полнотой сгорания) необходимо обеспечить достижение высоких температур в газогенераторе, при которых экзотермический процесс в газогенераторе, проходящий в отсутствие внешнего воздуха, приводит к образованию газа и дисперсной смеси продуктов неполного сгорания, которые, поступая в камеру дожигания, полностью окисляются кислородом воздуха.

В работе [3] предложено использовать в качестве одного из перспективных диспергаторов в газогенераторе высокоэнтальпийное полиазотистое органическое соединение — 7-амино-7*H*-дифурано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фуроксано[3'',4''-*d*]азепин (I) $C_6H_2N_8O_4$, имеющее энтальпию образования $\Delta H_f^\circ = 2805.3 \pm 6.8$ кДж·кг⁻¹ и теплоту сгорания 13.4 МДж·кг⁻¹ [4]:



Однако при переходе к использованию высокоэнтальпийных компонентов в твердых топливах для прямоточных воздушных ракетных двигателей чувствительность топлива к тепловому воздействию возрастает (термическая стабильность ухудшается), и это обстоятельство усугубляет проблему обеспечения безопасности полета.

В данной работе поставлена задача установить кинетические закономерности тепловыделения в реакции термического разложения индивидуального (I) и бинарного топливного состава (I) с синтетическим изопреновым каучуком СКИ-3 в массовом соотношении 64:36%, т. е. в композиции, обеспечивающей максимальную дальность маршевого прямолинейного горизонтального полета авиационной ракеты воздух-воздух большой дальности с прямоточным воздушным ракетным двигателем, в котором основным окислителем при горении твердого топлива является воздух [3]. Соединение (I) достаточно стабильное для использования в смесевых твердых ракетных топливах, где возможные температуры эксплуатации не превышают 60°C, но многие ракеты с прямоточными воздушными ракетными двигателями в процессе полета сильно нагреваются (до 200°C и выше, при этом для разных типов ракет в процессе выполнения поставленных задач установлены разные режимы эксплуатации), поэтому следует установить, к какому уровню термораспада приведет выдержка указанного топлива в течение заданного времени при заданной температуре, и тем самым определить круг двигателей и полетных заданий, внутри которых можно применять (I) в качестве компонента топлива.

Экспериментальная часть

Синтез и очистка (I). В основу синтеза азепина (I) положена реакция раствора 3,4-бис(4-нитрофуран-3-ил)фуроксана (BNFF) в ацетонитриле с избытком гидразин-гидрата [5]. Вещество (I) относится к классу взрывчатых веществ, экспериментально измеренная его чувствительность составляет: к удару — 88% (10 кг, 25 см) и к трению 2178 кг·см⁻² [6].

Поскольку степень чистоты исследуемых компонентов существенно влияет на показатели термической стабильности, были отработаны методы получения прецизионно чистых образцов соединения (I), включающие трехкратную перекристаллизацию из смеси ДМФА/этанол. Удаление остаточных растворителей осуществляли сушкой в вакууме (15–20 мм рт. ст.) при 90°C. Контроль чистоты полученных соединений проводили с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии. Содержание примесей не превышало 0.1 мас%. Образцы анализировали на хроматографе серии 20 с термостатом колонок и диодно-матричным детектором фирмы Shimadzu. Колонка Luna C18(2) 250 × 4.6 × 5μ Phenomenex, США. Подвижная фаза: 70% MeCN и 30% H₂O. Температура термостата и детектора 40°C; скорость подачи элюента 0.8 мл·мин⁻¹. Время удерживания

азепина (I) 3.9 мин. Детектирование осуществлялось на длинах волн 209, 230 и 254 нм.

Методика исследования скоростей тепловыделения

Ранее проведенный [6] анализ ДТГ–ДТА при скорости нагрева (I) $6.0 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$ и навеске 6.8 мг показал, что потеря массы начинается с 250°C с достижением максимума скорости тепловыделения при 282°C . Однако поскольку оценка термостабильности по кривой ДТА носит вспомогательный, качественный характер, для расчета реального уровня термораспада как функции температуры и времени необходимо изучать кинетику термораспада в изотермических условиях с определением кинетических параметров термораспада, в том числе вида кинетической зависимости от концентрации компонентов, зависимости кинетических констант от температуры [7].

Скорость тепловыделения в изотермических условиях при термическом разложении (I) в интервале температур $190.8\text{--}231.9^\circ\text{C}$ и топлива на его основе в интервале температур $161.6\text{--}198.8^\circ\text{C}$ определяли с помощью разработанного и изготовленного в Институте проблем химической физики РАН дифференциального автоматического микрокалориметра ДАК-1-2, позволяющего измерять скорость тепловыделения в пределах $10^{-5}\text{--}1.0 \text{ Вт}$ в различных системах в интервале температур $25\text{--}400^\circ\text{C}$ с постоянной времени $10\text{--}100 \text{ с}$ с неограниченной длительностью регистрации эксперимента [8].

Образцы топлива изготавливали путем растворения навески каучука в толуоле, последующего добавления в полученную смесь навески (I), тщательного перемешивания и последующей отгонки толуола под тягой при комнатной температуре до постоянной массы навески, равной сумме масс исходных СКИ-3 и (I).

Калориметрические кинетические исследования проводили в закрытой системе: стеклянные ампулы с навесками $\sim 50 \text{ мг}$ (I) или $\sim 20 \text{ мг}$ топлива предва-

рительно вакуумировали до остаточного давления 1.3 Па , после чего ампулы запаивали и помещали в калориметр. Ампулы с образцами по всей длине имеют температуру термостата, что позволяет сохранять все продукты превращения в зоне реакции. Объем ампул составлял $\sim 2 \text{ см}^3$, величина отношения массы образца к свободному объему ампулы — около $25 \cdot 10^{-3}$ для (I) и $10 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ для топлива.

Обсуждение результатов

Кинетические закономерности тепловыделения при разложении (I). Полученные экспериментальные кривые скоростей тепловыделения dQ/dt при разложении (I) в исследуемом температурном интервале представлены на рис. 1, 2.

Численным интегрированием кривых скоростей тепловыделения от нулевого времени до текущего момента и до времени завершения процесса разложения находили значение количества тепла Q_t , выделившегося к данному моменту времени:

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

где dQ/dt — скорость тепловыделения, и полную теплоту разложения

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

Полная теплота разложения (I) Q_0 составила около $2.3 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}$.

С помощью программы Origin установлено, что экспериментальные кинетические кривые зависимости выделяющегося тепла Q_t от времени описываются интегральным уравнением (1) автокаталитической реакции первого порядка с минимальным отклонением расчетных данных от экспериментальных (рис. 3):

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

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

В этом случае зависимость скорости тепловыделения от глубины разложения определяется уравнением

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

где $\eta = Q_t/Q_0$ — глубина автокаталитической реакции 1-го порядка.

Кинетические закономерности тепловыделения при разложении топлива на основе (I). Экспериментальные кривые скоростей тепловыделения dQ/dt при разложении топлива на основе (I) при исследуемых температурах приведены на рис. 4, 5.

Полная теплота разложения топлива Q_0 составила около $2.09 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}$ топлива или 3.26 кДж на 1 г (I) в топливе, что выше теплоты разложения чистого (I) ($2.30 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}$) и, вероятно, объясняется участи-

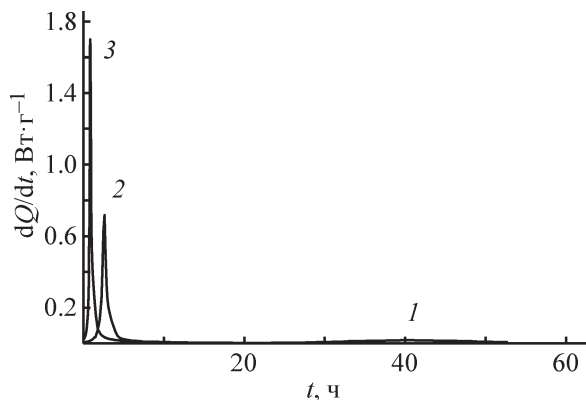


Рис. 1. Зависимость скорости тепловыделения от времени при термическом разложении (I) в твердой фазе при температуре 190.8 (1), 221.0 (2), 231.9°C (3).

ем СКИ-3 во вторичных экзотермических реакциях окисления продуктами разложения (I).

Экспериментальные кривые тепловыделения при разложении топлива до примерно 70%-ной глубины разложения ($\eta = Q_t/Q_0$) с минимальным отклонением расчетных данных от экспериментальных (рис. 6) описываются, как и в случае разложения чистого (I), интегральным уравнением автокаталитической реакции первого порядка (1) с заменой Q_0 на $Q_{1,0}$, где $Q_{1,0}$ — полная теплота разложения в автокаталитической реакции первого порядка, которая составила около 1.46 кДж·г⁻¹ топлива.

В этом случае зависимость скорости тепловыделения от глубины разложения определяется уравнением

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

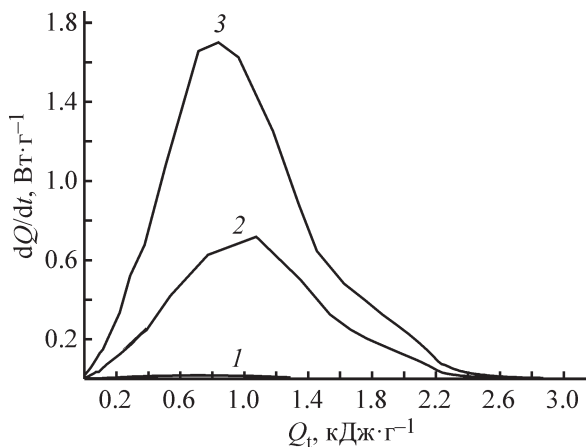


Рис. 2. Зависимость скорости тепловыделения от количества тепла, выделившегося к данному моменту времени, пропорционального глубине реакции, при термическом разложении (I) в твердой фазе при температуре 190.8 (1), 221.0 (2), 231.9°C (3).

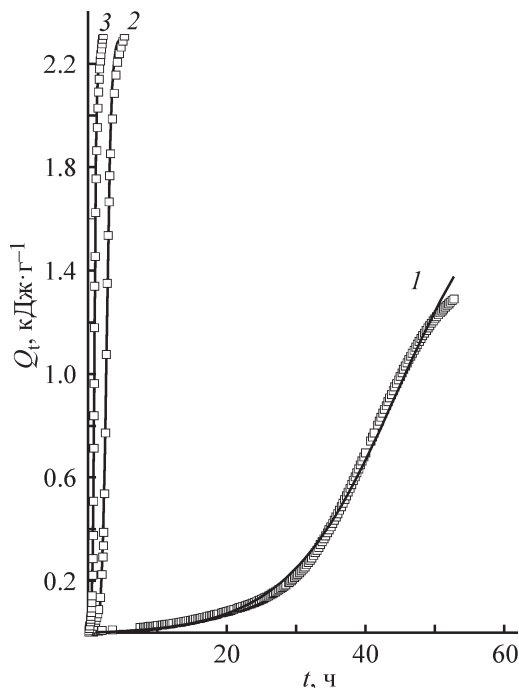


Рис. 3. Кинетические зависимости тепла, выделившегося при разложении (I), от времени при температуре 190.8 (1), 221.0 (2), 231.9°C (3).

Точки — эксперимент, сплошные кривые — расчет по уравнению (1).

где $\eta_1 = Q_t/Q_{1,0}$ — глубина автокаталитической реакции 1-го порядка.

Аррениусовские зависимости найденных констант скоростей некаталитической k_1 и каталитической k_2 реакций термического разложения (I) и топлива на его основе от температуры представлены на рис 7, 8.

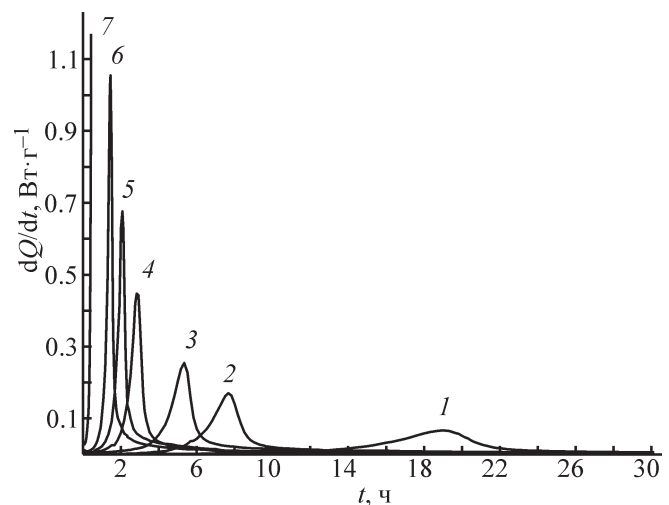


Рис. 4. Зависимость скорости тепловыделения от времени при разложении топлива при температуре 161.6 (1), 171.2 (2), 175.0 (3), 180.3 (4), 184.2 (5), 188.4 (6), 198.8°C (7).

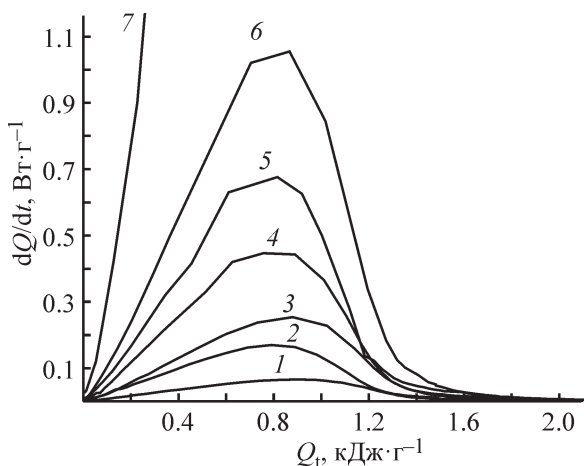


Рис. 5. Зависимость скорости тепловыделения от количества тепла, выделившегося к данному моменту времени при разложении топлива при температуре 161.6 (1), 171.2 (2), 175.0 (3), 180.3 (4), 184.2 (5), 188.4 (6), 198.8°C (7).

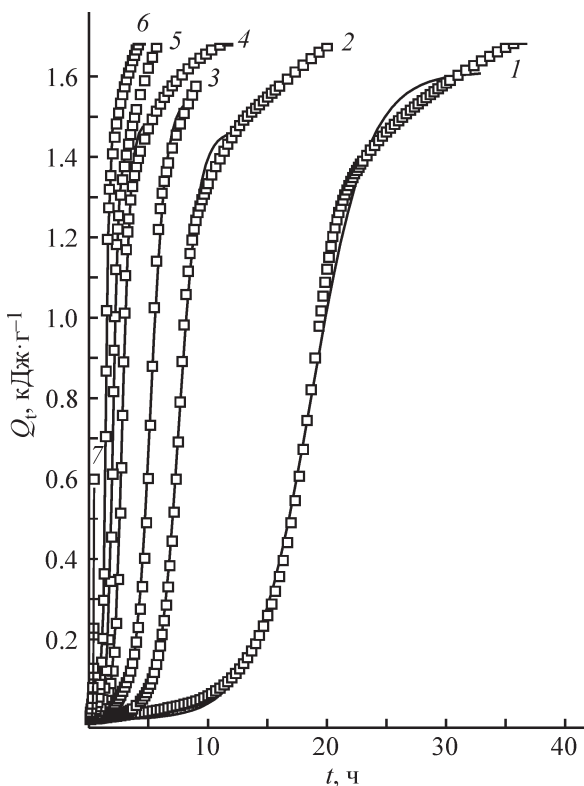


Рис. 6. Кинетические зависимости тепла, выделившегося при разложении топлива, от времени при температуре 161.6 (1), 171.2 (2), 175.0 (3), 180.3 (4), 184.2 (5), 188.4 (6), 198.8°C (7).

Точки — эксперимент, сплошные кривые — расчет по уравнению (1).

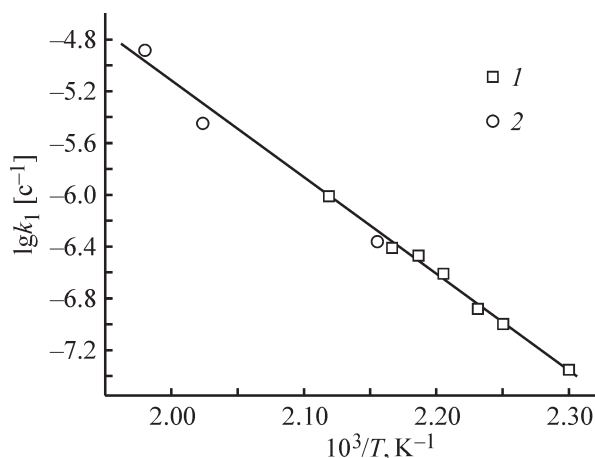


Рис. 7. Зависимость логарифма константы скорости некаталитической реакции от обратной температуры.

1 — топливо, 2 — (I).

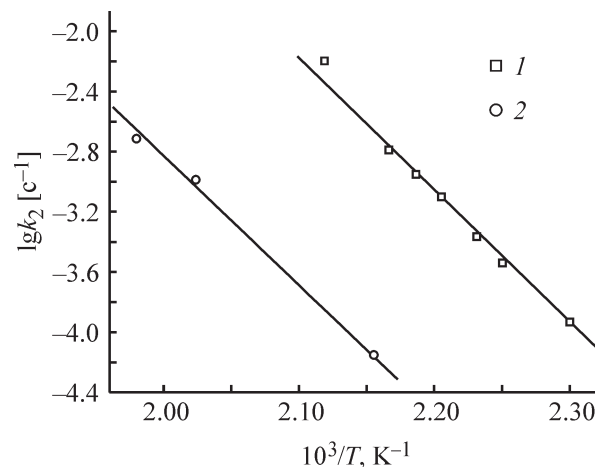


Рис. 8. Зависимость логарифма константы скорости каталитической реакции от обратной температуры.

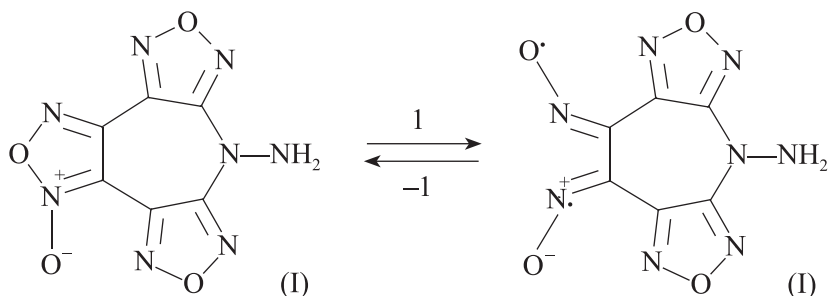
1 — топливо, 2 — (I).

Константа скорости некаталитической реакции при разложении (I) и топлива описывается одной и той же температурной зависимостью

$$k_1 = 10^{9.7 \pm 0.6} \exp[(-141.8 \pm 5.0) \cdot 10^3 / RT], \text{ с}^{-1},$$

$$R = 8.314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}.$$

Следовательно, начальная некаталитическая реакция и в топливе, и в (I) имеет одну и ту же природу и, вероятно, представляет собой обратимую стадию ступенчатого циклораспада фуросанового цикла с образованием бирадикального переходного состояния [9–13]:



В отличие от совпадения констант скоростей начальной некаталитической реакции разложения индивидуального (I) и топлива на его основе константа скорости каталитической реакции k_2 при разложении топлива примерно в 30 раз больше константы

$$k_2 = 10^{17.7 \pm 0.8} \exp[(-180.7 \pm 7.5) \cdot 10^3 / RT], \text{ с}^{-1}, \text{ для топлива};$$

$$k_2 = 10^{14.4 \pm 0.9} \exp[(-164.8 \pm 8.4) \cdot 10^3 / RT], \text{ с}^{-1}, \text{ для индивидуального (I) (рис. 8).}$$

Вследствие высоких скоростей каталитической реакции при температурах выше 220°C при исследовании реакции разложения топлива в отличие от разложения индивидуального (I) уже не удается зафиксировать всю кривую скорости тепловыделения, максимальная скорость достигается за время прогрева ампулы в калориметре (10 мин), и после прогрева записывается только конечный участок спада кривой скорости тепловыделения (рис. 9).

Процесс протекает настолько интенсивно, что происходит разбрасывание топлива по всему объему ампулы, и вся внутренняя поверхность ампулы покрывается черной пленкой продуктов разложения топлива.

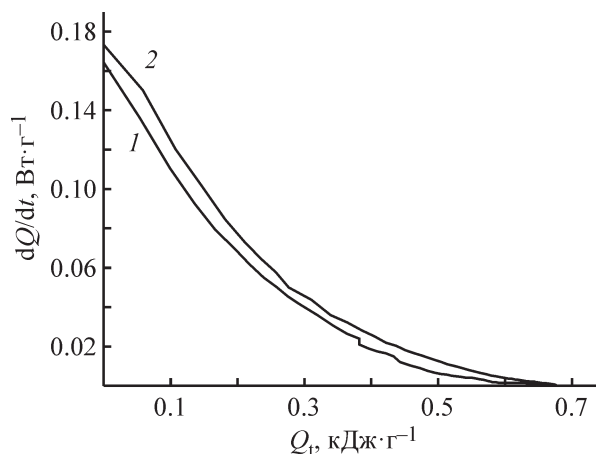


Рис. 9. Зависимость скорости тепловыделения от текущей теплоты процесса при разложении топлива при температуре 225.3 (1), 233.0°C (2).

скорости каталитической реакции при разложении индивидуального (I) при одинаковых температурах. Соответствующие выражения для температурной зависимости величин k_2 представляются в виде

Влияние на степень автокатализа отношения величины массы навески топлива к величине внутреннего объема ампулы m/V исследовано при 180.3°C (рис. 10).

Начальная скорость разложения практически не зависит от величины m/V , а величина максимальной скорости тепловыделения увеличивается с ростом m/V , что свидетельствует об ускоряющем влиянии газообразных продуктов разложения топлива, равновесно распределяющихся между конденсированной и газовой фазами. Более сильное проявление автокатализа при разложении топлива по сравнению с разложением индивидуального (I) может быть связано с меньшей скоростью удаления газов из навески

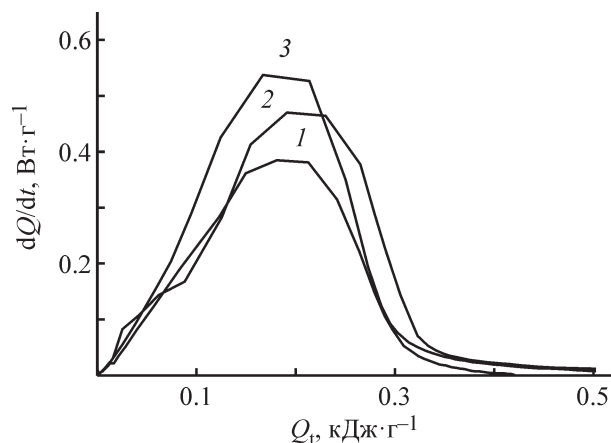


Рис. 10. Зависимость скорости тепловыделения от текущей теплоты процесса при разложении топлива при 180.3°C при $m/V 9.0 \cdot 10^{-3}$ (1), $17.7 \cdot 10^{-3}$ (2), $25.2 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ (3).

структурированного топлива по сравнению с рыхлой структурой порошка (I).

Приведенные выше экспериментально определенные кинетические параметры могут позволить оценить, соответствует ли само соединение (I) или его композиция со связующим требованиям по термостабильности. Эти требования сильно разнятся для разных видов энергетических композиций.

В крупных зарядах смесевых твердых ракетных топлив затруднена диффузия газообразных продуктов термораспада из топливного заряда наружу и высока вероятность возникновения теплового взрыва за счет меньшей величины теплоотвода из единицы массы энергетического состава. Для таких топлив было предложено установить в качестве базовой точки время разложения на 0.02% и именно по времени достижения этого уровня при комнатной температуре устанавливать гарантийный срок хранения [14], который реально может быть выше 10 лет. Топлива же для многих типов прямоточных воздушных ракетных двигателей в процессе эксплуатации могут подвергаться относительно краткосрочным высоким перегревам (до 200°C и выше), поэтому для разных типов прямоточных воздушных ракетных двигателей

следует знать по крайней мере уровень термораспада предполагаемого топлива при его экспозиции в течение разного времени при заданном наборе температур и отсюда решать вопрос о пригодности рассматриваемого топлива для данного изделия.

В таблице приведены значения времени t достижения степеней разложения топлива, равных 0.02, 0.1 и 1%, в интервале температур 20–200°C для исследуемого состава [(I):СКИ-3 = 64:36]. Расчет проводили по формуле

$$t = k_2^{-1} \ln[(\eta + \eta_0)/(\eta_0(1 - \eta))]$$

для автокаталитической реакции первого порядка в предположении, что $\eta_0 = k_1/k_2 \ll 1$. Так как в автокаталитической реакции распадается только 70% топлива, расчет по формуле проводили для степеней разложения 0.00028, 0.0014 и 0.014, которые соответствуют степеням разложения 0.0002, 0.001 и 0.01 при полном разложении топлива по обеим реакциям с суммарной теплотой Q_0 .

Из данных таблицы видно, что даже длительная эксплуатация исследуемых составов при температурах до 70–80°C не представляет никаких угроз по

Время достижения заданной степени разложения (0.02, 0.1 и 1%) в интервале температур 20–200°C для состава (I): СКИ-3 = 64:36

$T, ^\circ\text{C}$	$t_{0.02\%}$	$t_{0.1\%}$	$t_{1\%}$
20	36206 лет	179966 лет	1691141 лет
30	5131.5 лет	25394 лет	228708 лет
40	833.2 лет	4095 лет	34753 лет
50	152.2 лет	740.8 лет	5815 лет
60	30.9 лет	148.1 лет	1057 лет
70	6.9 лет	32.3 лет	206.8 лет
80	1.7 лет	7.6 лет	43.3 лет
90	0.43 лет	1.93 лет	9.67лет
100	44.4 сут	0.52 лет	2.3 лет
110	13.2 сут	53.7 сут	0.58 лет
120	4.2 сут	16.0 сут	56.7 сут
130	1.38 сут	5.0 сут	16.0 сут
140	11.5 ч	1.63 сут	4.78 сут
150	4.2 ч	13.3 ч	1.50 сут
160	1.57 ч	4.70 ч	11.8 ч
170	0.61 ч	1.72 ч	4.08 ч
180	0.25 ч	0.65 ч	1.47 ч
190	0.10 ч	0.26 ч	0.55 ч
200	0.044 ч	0.10 ч	0.21 ч

термостабильности, до 160°C допустимы нагревы до нескольких часов, при 190–200°C допустимы только очень краткосрочные нагревы (несколько минут). Окончательное решение о возможности использования топлива в конкретных условиях следует принимать в зависимости от условий предполагаемого режима эксплуатации данного вида летательных аппаратов.

Выводы

Кинетика тепловыделения в реакции термического разложения 7-амино-7Н-дифуразано[3,4-*b*:3',4'-*f*]фу-роксано[3'',4''-*d*]азепина и бинарного топлива на его основе до больших глубин разложения описывается законом автокаталитической реакции первого порядка. Константы скорости начальной некаталитической реакции разложения индивидуального соединения и топлива совпадают, а константы скорости каталитической реакции разложения топлива примерно на 1.5 порядка превышают соответствующие константы при разложении индивидуального соединения. Теплота реакции разложения топлива превышает теплоту разложения индивидуального соединения за счет вовлечения связующего во вторичные реакции с продуктами разложения индивидуального соединения.

Расчет времени достижения 1%-ной глубины термического разложения топлива при его эксплуатации при разных температурах, проведенный на основании установленного кинетического закона разложения топлива и температурных зависимостей констант скоростей некаталитической и каталитической реакций, показывает, что при температурах 70–80°C оно составляет сотни лет, при 160°C — несколько часов, при 190–200°C — несколько минут. Эти данные позволяют выбрать эффективный режим эксплуатации летательного аппарата при применении данного топлива.

Кроме того, знание кинетических закономерностей тепловыделения в дальнейшем будет служить базой для расчета граничных условий возникновения теплового взрыва при аэродинамическом нагреве отвержденного топлива, в том числе неоднократно.

Финансирование работы

Работа выполнена на средства Института проблем химической физики РАН по темам 0089-2019-0005 «Фундаментальные и проблемно-ориентированные исследования в области создания энергетических конденсированных систем (ЭКС)

различного назначения» (номер госрегистрации АААА-А19-119100800130-0) и 0089-2019-0017 (номер госрегистрации АААА-А19-119101690058-9) «Комплексные фундаментальные и проблемно-ориентированные исследования в области физики и химии горения и теплообмена высокоэнергоемких твердых и жидких топлив (горючих) и материалов нового поколения для высокотемпературных камер сгорания прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД)» при финансовой поддержке программой Президиума РАН «Перспективные физико-химические технологии специального назначения».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Казаков Анатолий Иванович, д.х.н., зав. лаб. ИПХФ РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3760-7514>

Лемперт Давид Борисович, к.х.н., г.н.с. ИПХФ РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0219-1571>

Набатова Альбина Валентиновна, мл.н.с. ИПХФ РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1602-9380>

Дашко Дмитрий Владимирович, к.х.н., нач. лаб. ФГУП СКТБ «Технолог», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3560-4248>

Разносчиков Владимир Валентинович, к.т.н., доцент, с.н.с. ИПХФ РАН и в.н.с. ЦИАМ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3091-7595>

Яновский Леонид Самойлович, д.т.н., проф., зав. отд. ИПХФ РАН и зав. отд. ЦИАМ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2603-6795>

Алдошин Сергей Михайлович, акад., научный руководитель ИПХФ РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3555-7442>

Список литературы

- [1] *Mitsuno M., Kuwahara T., Kosaka K., Kubota N.* Combustion of metallized propellants for ducted rockets // 23rd Joint Propulsion Conf., 29 June 1987–02 July 1987, San Diego, CA, U.S.A., AIAA Paper N 87-1724. <https://doi.org/10.2514/6.1987-1724>
- [2] *Chen B., Xia Z., Huang L., Ma L.* Characteristics of the combustion chamber of a boron-based solid propellant ducted rocket with a chin-type inlet // *Aerospace Sci. and Technol.* 2018. V. 82–83. P. 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.08.035>

- [3] Яновский Л. С., Лемперт Д. Б., Разносчиков В. В., Аверьков И. С. Оценка эффективности твердых топлив на основе высокоэнтальпийных диспергаторов для ракетно-прямоточных двигателей // ЖПХ. 2019. Т. 92. № 3. С. 322–342 [Yanovskii L. S., Lempert D. B., Raznoschikov V. V., Aver'kov I. S. Evaluation of effectiveness of solid fuels based on high enthalpy dispersants for rocket ramjet engines // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. N 3. P. 367–388. <https://doi.org/10.1134/S1070427219030078>].
- [4] Алдошин С. М., Лемперт Д. Б., Гончаров Т. К., Казаков А. И., Согласнова С. И., Дорофеенко Е. М., Плишкин Н. А. Энергетические возможности смесевых твердых ракетных топлив на основе бимолекулярных кристаллов, содержащих CL-20 // Изв. АН. Сер. хим. 2016. № 8. С. 2018–2024 [Aldoshin S. M., Lempert D. B., Goncharov T. K., Kazakov A. I., Soglasnova S. I., Dorofeenko E. M., Plishkin N. A. Energetic potential of solid composite propellants based on CL-20 containing bimolecular crystals // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. N 8. P. 2018–2024. <https://doi.org/10.1007/s11172-016-1546-1>].
- [5] Astrat'ev A. A., Dashko D. V., Stepanov A. I. Unusual reaction of 3,4-bis(3-nitrofurazan-4-yl)furoxan with ammonia, primary amines and hydrazine // Central Eur. J. Chem. 2012. V. 10. N 4. P. 1087–1094. <https://doi.org/10.2478/s11532-012-0020-7>
- [6] Stepanov A. I., Dashko D. V., Astrat'ev A. A. 3,4-bis(4'-nitrofurazan-3'-yl)furoxan: a melt cast powerful explosive and a valuable building block in 1,2,5-oxadiazole chemistry // Central Eur. J. Energetic Mater. 2012. V. 9. N 4. P. 329–342.
- [7] Манелис Г. Б., Назин Г. М., Рубцов Ю. И., Струнин В. А. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. М.: Наука, 1996. С. 11
- [Manelis G. B., Nazin G. M., Rubtsov Yu. I., Strunin V. A. Thermal decomposition and combustion of explosives and propellants. London; New York: Taylor and Francis Group, 2003].
- [8] Галюк О. С., Рубцов Ю. И., Малиновская Г. Ф., Манелис Г. Б. Микрокалориметр для исследования кинетики химических реакций // Журн. физ. химии. 1965. Т. 39. С. 2319–2322.
- [9] Прокудин В. Г., Назин Г. М., Дубихин В. В. Термическое разложение диметилфуразапа и диметилфуроксана в газовой фазе // Кинетика и катализ. 1981. Т. 22. С. 871–876.
- [10] Прокудин В. Г., Назин Г. М., Манелис Г. Б. О механизме термического разложения фуранов и фуроксанов // ДАН СССР. 1980. Т. 255. С. 917–920.
- [11] Максимов Ю. А., Когут Э. Н., Сорокина Е. Г. Термическое разложение бензотрифуроксана // Химическая физика конденсированных взрывчатых веществ. М. : Тр. МХТИ. 1979. Вып. 104. С. 19–22.
- [12] Зверев В. В., Сайфуллин И. Ш., Шарнин Г. П. Экспериментальное и теоретическое изучение термической стабильности ряда азотсодержащих органических соединений // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1978. Т. 27. № 2. С. 313–317.
- [13] Никишев Ю. Ю., Сайфуллин И. Ш., Ключников О. Р. Квантово-химический индекс реакционной способности гетероароматических соединений в реакциях гомолитического циклораспада // Кинетика и катализ. 1993. Т. 34. С. 969–971.
- [14] Корсунский Б. Л., Манелис Г. Б., Назин Г. М., Столяров П. Н. Методологические проблемы определения термической стабильности взрывчатых материалов // Рос. хим. журн. 1997. Т. 41. № 4. С. 49–54.