

Научная статья

УДК 614:84; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-155-163

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ЭЛАСТИЧНОГО ПЕНОПОЛИУРЕТАНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ**

✉ Безапонная Оксана Владимировна;

Глухих Павел Александрович;

Макаркин Сергей Викторович.

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

✉ [bezzaponnay@mail.ru](mailto:bezzaponnay@mail.ru)

*Аннотация.* Методом синхронного термического анализа изучены пожароопасные свойства эластичного пенополиуретана при скоростях нагрева 5 °C/мин, 10 °C/мин и 20 °C/мин. Установлен двухстадийный режим протекания термоокислительной деструкции в интервале температур 25–700 °C, включающий стадию тления и стадию пламенного горения. Интенсивность тепловыделения процесса пламенного горения эластичного пенополиуретана в 5–6 раз превышает интенсивность тепловыделения в результате тления. Определены значения температуры воспламенения для режима тлеющего горения и температуры самовоспламенения при разных скоростях нагрева с использованием аналитических сигналов трёх термоаналитических кривых синхронного термического анализа.

Изучена кинетика термоокислительной деструкции эластичного пенополиуретана методом динамической термогравиметрии. Рассчитаны кинетические параметры (порядок реакции, энергия активации, предэкспоненциальный множитель) по методу Бройдо при скорости нагрева 20 °C/мин. Использование полученных кинетических параметров процесса термоокислительной деструкции позволит проводить оценку возможности возгорания эластичного пенополиуретана в условиях пожара с формированием вторичных очагов пожара.

*Ключевые слова:* термоокислительная деструкция, тление, метод синхронного термического анализа, пенополиуретан, кинетические параметры

**Для цитирования:** Безапонная О.В., Глухих П.А., Макаркин С.В. Исследование особенностей термоокислительной деструкции эластичного пенополиуретана для решения диагностических задач пожарно-технической экспертизы // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 155–163. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-155-163.

Scientific article

## **RESEARCH OF THE FEATURES OF THERMAL-OXIDATIVE DESTRUCTION OF ELASTIC POLYURETHANE FOAM FOR SOLVING DIAGNOSTIC PROBLEMS OF FIRE-TECHNICAL EXPERTISE**

✉ Bezaponnaya Oksana V.;

Glukhikh Pavel A.;

Makarkin Sergey V.

Ural institute of the State fire service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia

✉ [bezzaponnay@mail.ru](mailto:bezzaponnay@mail.ru)

*Abstract.* The method of synchronous thermal analysis was used to study the fire hazardous properties of elastic polyurethane foam at heating rates of 5 °C/min, 10 °C/min and 20 °C/min. A two-stage mode of thermal-oxidative destruction in the temperature range of 25–700 °C was

established, including the stage of smoldering and the stage of flaming combustion. The intensity of heat release during the process of flaming combustion of elastic polyurethane foam is 5–6 times higher than the intensity of heat release as a result of smoldering. The values of the ignition temperature for the smoldering combustion mode and the autoignition temperature were determined at different heating rates using analytical signals of three thermoanalytical curves of synchronous thermal analysis.

The kinetics of thermal-oxidative destruction of elastic polyurethane foam was studied by the method of dynamic thermogravimetry. The kinetic parameters (reaction order, activation energy, pre-exponential factor) were calculated using the Broido method at a heating rate of 20 °C/min. The use of the obtained kinetic parameters of the process of thermal-oxidative destruction will allow us to assess the possibility of ignition of elastic polyurethane foam in fire conditions with the formation of secondary fire sources.

**Keywords:** thermal-oxidative destruction, smoldering, method of synchronous thermal analysis, polyurethane foam, kinetic parameters

**For citation:** Bezaponnaya O.V., Glukhikh P.A., Makarkin S.V. Research of the features of thermal-oxidative destruction of elastic polyurethane foam for solving diagnostic problems of fire-technical expertise // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 4 (72). P. 155–163. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-155-163.

## Введение

Особого внимания заслуживает изучение процесса термоокислительной деструкции (ТОД) полимеров, склонных к тлению, поскольку данный вид горения несёт не меньшую опасность, чем пламенное горение, а переход тлеющего горения в пламенное способствует формированию вторичных очагов пожара (ВОП). Однако ввиду сложности проведения экспериментальных исследований изучению процесса тления полимерных материалов посвящено гораздо меньше публикаций [1–3], чем анализу пламенного горения [4–8].

К самоподдерживающемуся тлеющему горению склонны пористые полимерные материалы, в частности, один из самых распространённых термореактивных полимеров – пенополиуретан (ППУ). Данный материал характеризуется высокой пожарной опасностью из-за его высокой горючести, склонности к тлению и токсичности газов (цианистого водорода, паров изоцианатов, оксидов углерода, предельных и непредельных углеводородов), выделяемых при тлеющем режиме горения [9].

Решение важных экспертных задач, касающихся диагностики склонности материалов к тлению, оценки кинетики протекания данного процесса, возможности перехода к пламенному горению с формированием ВОП возможно при использовании современных инструментальных методов, в частности, метода синхронного термического анализа (СТА), характеризующегося высокой информативностью и точностью.

При исследовании ППУ методами термического анализа [10] установлено, что процесс тления ППУ на термограмме проявляет себя как относительно слабый экзоэффект, сопровождаемый небольшой потерей массы (около 10 %), после чего следует второй экзопик, характеризующийся большим эффектом и значительной потерей массы в результате сгорания продуктов деструкции. Однако решение задачи диагностики склонности полимерных материалов к тлению, а также возможности их возгорания в температурных условиях пожара требует более детального исследования процесса термоокислительной деструкции этих материалов и ППУ в частности.

Исследование механизма термоокислительного разложения ППУ и оценка кинетических параметров его ТОД является предпосылкой достоверности численного моделирования формирования ВОП в результате тления и горения ППУ. Таким образом, целью данного исследования является определение закономерностей ТОД эластичного ППУ для диагностики ВОП.

## Материалы и методы исследования

Для экспериментального изучения особенностей ТОД ППУ был выбран эластичный ППУ ввиду широкого его применения для изготовления мягкой мебели. По данным работы [11], высокая воспламеняемость мебельных изделий из ППУ была признана основной причиной увеличения смертности от пожара за последние 20 лет.

ППУ синтезируется из полиолов и изоцианатов. Разложение ППУ в интервале температур 25–900 °С протекает в три стадии: потеря малоустойчивых органических соединений (расщепление связей в самом слабом звене цепи), окислительная деструкция органических компонентов и окислительная деструкция остаточного материала [7]. На первом этапе разложения разрываются уретановые связи с образованием изоцианатов и аминов, а на втором этапе разлагаются полиолы [11]. Изоцианаты удерживаются в конденсированной фазе в форме карбодиимида, который разлагается и испаряется при температуре 320 °С с образованием высокотоксичного цианистого водорода. Механические свойства пенополиуретана резко ухудшаются при температуре 150 °С, а при температурах выше 200 °С начинают разлагаться карбамат, а также группы мочевины [12].

Исследования проводились методом синхронного термического анализа на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter (Германия) в интервале температур от 25 до 700 °С в корундовых тиглях при скоростях нагрева 5 °С/мин, 10 °С/мин и 20 °С/мин, в среде воздуха (расход продувочного газа 80 мл/мин). Масса образцов ППУ составляла 3,0–3,2 мг. Для обработки полученных термограмм использовалось программное обеспечение NETZSCH Proteus 6.1.

Для получения максимальной информации о закономерностях ТОД эластичного ППУ использовались данные сразу четырёх термоаналитических кривых: термогравиметрической (ТГ) кривой, кривой дифференциальной термогравиметрии (ДТГ), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и первой производной от ДСК-сигнала – dДСК-кривой). Прием дифференцирования кривой ДСК сигнала с использованием программного обеспечения позволяет с высокой точностью определить точку перегиба на кривой, характеризующей резкое изменение теплового потока в результате протекания физико-химического процесса.

## Результаты исследований и их обсуждение

Термограмма эластичного ППУ приведена на рис. 1.

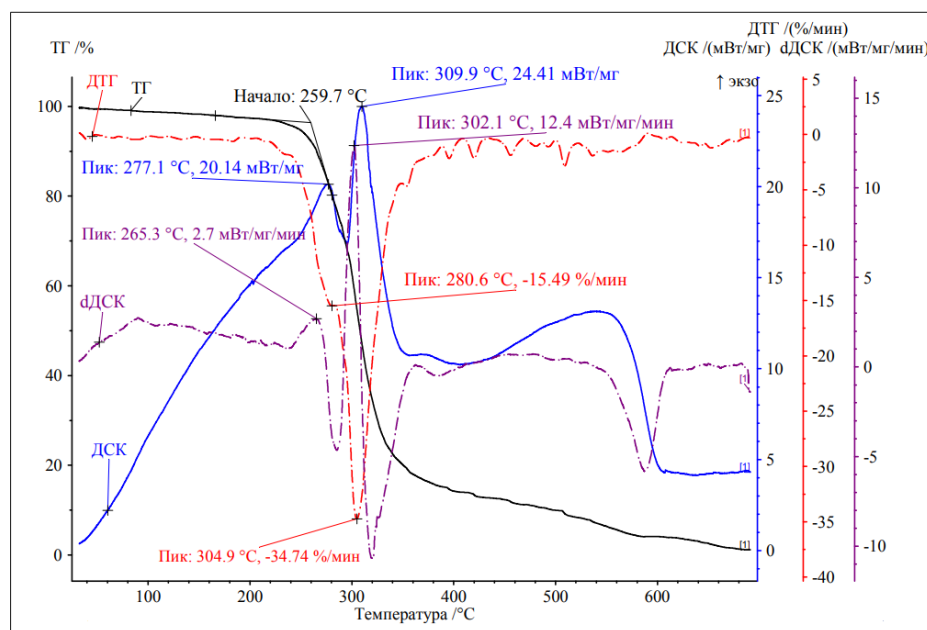


Рис. 1. Термограмма эластичного ППУ в среде воздуха при скорости нагрева 20 °С/мин

Процесс термоокислительного разложения эластичного ППУ начинается при температуре 259,7 °С и завершается при температуре примерно 400 °С. Анализ ТГ и ДТГ кривых в интервале температур 25–700 °С свидетельствует о двухстадийном протекании процесса ТОД ППУ, так как на ДТГ-кривой наблюдается двойной пик с максимумами при температурах 280,6 °С и 304,9 °С, что удовлетворительно согласуется с результатами [11]. Первый пик на ДТГ-кривой по данным [13] соответствует разрыву уретановых связей и выделению изоцианатных газов, а второй пик – выделению полиолов. Скорость потери массы на второй стадии значительно выше скорости потери на первой стадии. Значения температур максимумов первого и второго ДТГ-пиков ( $T_{ДТГ1}$ ,  $T_{ДТГ2}$ ), а также скорость потери массы при разных скоростях нагрева приведены в табл. 1.

На ДСК-кривой также образуется два пика, удельный тепловой поток второго пика (24,41 мВт/мг) превышает удельный тепловой поток первого ДСК-пика (20,14 мВт/мг). Формирование двух пиков на ДСК-кривой характеризует протекание процесса ТОД в две стадии: гетерогенного режима горения (тления), перерастающего в гомогенное горение (второй ДСК-пик). Температуры максимумов ДСК-пиков ( $T_{ДСК1}$ ,  $T_{ДСК2}$ ) при разных скоростях нагрева образцов ППУ приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Термоаналитические характеристики термоокислительной деструкции ППУ  
по результатам ДТГ и ДСК при разных скоростях нагрева**

Скорость нагрева, °С/мин	Процесс тления			Процесс пламенного горения		
	$T_{ДТГ1}$ , °С	$A_{ДТГ1}$ , %/мин	$T_{ДСК1}$ , °С	$T_{ДТГ2}$ , °С	$A_{ДТГ2}$ , %/мин	$T_{ДСК2}$ , °С
5	262,2	2,52	260,4	301,3	12,28	304,9
10	276,1	10,32	268,1	302,1	19,79	306,8
20	280,6	15,49	277,1	304,9	34,74	309,9

Прием дифференцирования кривой ДСК-сигнала позволяет с высокой точностью определить точку перегиба на ДСК-кривой по максимуму  $dДСК$ -пика, характеризующего экстремальное состояние горючего материала в результате самоподдерживающегося экзотермического процесса. Согласно тепловой теории Н.Н. Семёнова условием возникновения горения является резкое возрастание скорости тепловыделения, в результате чего достигается условие самовоспламенения вещества (интенсивность тепловыделения становится выше интенсивности теплоотвода).

Для определения показателей пожарной опасности веществ и материалов, в частности температуры самовоспламенения методами термического анализа, с помощью проведения касательных к базовой линии и к стороне ДСК-пика определяют середину отрезка, соединяющего точки пересечения касательных [13]. Дифференцирование ДСК-кривой с использованием программного обеспечения позволяет определить точку перегиба, соответствующую максимуму на  $dДСК$ -кривой и характеризующую резкое повышение интенсивности теплового потока в результате самовоспламенения при исследовании самоподдерживающегося экзотермического процесса [14]. При диагностике пика на  $dДСК$ -кривой, характеризующего процесс самовоспламенения, помимо соблюдения условия максимальной скорости тепловыделения при данной температуре, необходимо также, чтобы в температурном интервале  $dДСК$ -пика соблюдалось условие достижения максимальной скорости потери массы за счет выделения газов в результате ТОД исследуемого материала. То есть оценка температуры самовоспламенения исследуемых материалов проводится с использованием аналитических сигналов сразу трех термоаналитических кривых (ДТГ, ДСК и  $dДСК$ ), что демонстрирует высокую информативность метода СТА. В работе [14] приведены примеры оценки температуры самовоспламенения полимеров разной химической природы.

В случае ППУ данный подход можно применить для определения не только температуры его самовоспламенения, но и температуры тления по температуре максимума первого dДСК-пика. При этом также должны выполняться несколько условий: максимальной скорости потери массы в диапазоне интервала температур dДСК-пика и максимальное тепловыделение. В табл. 2 приведены результаты определения температуры тления и самовоспламенения эластичного ППУ при разных скоростях нагрева.

Таблица 2

### Температура воспламенения и самовоспламенения эластичного ППУ

Скорость нагрева, град/мин	Процесс тления		Процесс пламенного горения	
	$T_{\text{адСК1}}, ^\circ\text{C}$	$q_{\text{адСК1}}$	$T_{\text{адСК2}}, ^\circ\text{C}$	$q_{\text{адСК2}}$
5	254,0	0,35	297,8	2,34
10	257,3	0,91	298,0	6,32
20	265,3	2,70	302,1	12,40

*Примечание:*  $T_{\text{адСК1}}$  – температура максимума первого dДСК-пика;  $T_{\text{адСК2}}$  – температура максимума второго dДСК-пика;  $q_{\text{адСК1}}$  – интенсивность тепловыделения стадии тления;  $q_{\text{адСК2}}$  – интенсивность тепловыделения стадии пламенного горения

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что интенсивность тепловыделения при пламенном горении примерно в 5–6 раз выше, чем при тлении. Факт превышения интенсивности тепловыделения процесса пламенного горения над интенсивностью тепловыделения процесса тления в несколько раз может быть использован в качестве критерия для диагностики склонности материалов к тлению. Повышение скорости нагрева приводит к возрастанию интенсивности тепловыделения. При повышении скорости нагрева значения температур, характеризующих пожароопасные свойства ППУ, смещаются в высокотемпературную область.

Для оценки кинетических параметров процесса ТОД эластичного ППУ применялся метод Бройдо, в котором кинетические параметры определяются с использованием результатов динамической термогравиметрии при одной скорости нагрева. Расчёты кинетических параметров методом Бройдо [15] с использованием данных ТГ-кривой основаны на уравнении формальной кинетики:

$$-\frac{dm}{dt} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \cdot m^n, \quad (1)$$

где  $m$  – масса образца на момент времени  $t$ ;  $n$  – порядок реакции.

$$T = T_0 + \beta \cdot t, \quad (2)$$

где  $T_0$  – исходная температура;  $\beta$  – скорость нагрева;  $\beta = dT/dt = \text{const}$ .

Применение допущения  $n = 1$ , предложенного Бройдо [15] для реакций деструкции полимеров, позволяет преобразовать уравнение (1) с учётом (2) к уравнению вида:

$$-\frac{dm}{m} = \left(\frac{A}{\beta}\right) \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} dT. \quad (3)$$

ТГ кривая реакции деструкции полимера представляет собой это уравнение, проинтегрированное по температуре  $T$  [15].

После интегрирования и логарифмирования уравнение (3) принимает вид:

$$\ln \left[ \ln \frac{100}{100 - \Delta m} \right] = \ln \frac{A \cdot \Delta T}{\beta} + \frac{E_a}{RT},$$

где  $\Delta m$  – потеря массы образца, %.

Для проведения расчетов энергии активации  $E_a$  по ТГ-кривым определялись значения потери массы ( $\Delta m$ , %) с шагом 5 градусов, в интервале температур от начала потери массы до температуры точки перегиба на ТГ-кривой, которая соответствует температуре максимальной скорости ТОД полимеров. Графические зависимости  $\ln \left[ \ln \frac{100}{100-\Delta m} \right]$  от обратной температуры для двух стадий ТОД эластичного ППУ приведены на рис. 2.

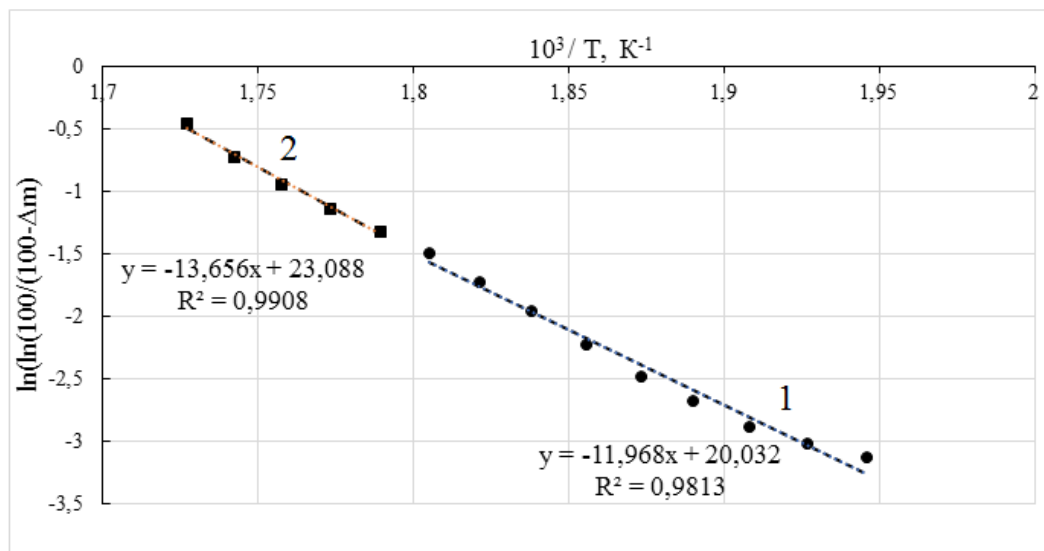


Рис. 2. Графические зависимости  $\ln \left[ \ln \frac{100}{100-\Delta m} \right]$  от обратной температуры:  
1 – стадия тления; 2 – стадия пламенного горения

Значения эффективной энергии активации  $E_a$  рассчитывали по формуле:

$$E_a = R \cdot tg\alpha,$$

где  $tg\alpha$  – тангенс угла наклона зависимости двойного логарифма  $\ln \left[ \ln \frac{100}{100-\Delta m} \right]$  от  $1/T$ . Из полученных уравнений линии тренда, с учетом скорости нагрева, рассчитаны значения предэкспоненциального множителя  $A$ . Порядок реакции  $n$  определялся по тангенсу угла наклона зависимости логарифма скорости потери массы  $\lg V$  от логарифма потери массы  $\lg \Delta m$ . Полученные значения  $E_a$ ,  $A$  и  $n$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Кинетические параметры процесса ТОД эластичного ППУ  
при скорости нагрева 20 град/мин в среде воздуха**

Стадия ТОД	Энергия активации $E_a$ , кДж/моль	Порядок реакции, $n$	Предэкспоненциальный множитель, $A$ , с <sup>-1</sup>
Тление	99,50	0,8	$2,92 \cdot 10^8$
Пламенное горение	113,54	1,1	$9,11 \cdot 10^9$

Полученные результаты согласуются с результатами исследований, представленные в литературных источниках [16].

## Заключение

Результаты исследования пожароопасных свойств эластичного ППУ пенополиуретана методом СТА показали, что его термоокислительная деструкция состоит из двух стадий: стадии тления и стадии пламенного горения. Получены значения температуры воспламенения для режима тлеющего горения и температуры самовоспламенения ППУ при разных скоростях нагрева с использованием аналитических сигналов трёх термоаналитических кривых СТА. Установлено, что с повышением скорости нагрева, значения исследуемых показателей пожарной опасности возрастают.

Методом динамической ТГ изучена кинетика термоокислительной деструкции эластичного ППУ и определены кинетические параметры (порядок реакции, энергия активации, предэкспоненциальный множитель) стадии тления и стадии пламенного горения ТОД эластичного ППУ по методу Бройдо для дальнейшей оценки возможности его возгорания в условиях пожара с формированием вторичных очагов пожара. Таким образом, применение высокоинформативного метода СТА позволяет детально исследовать процесс ТОД полимеров и использовать полученную информацию для решения диагностических задач пожарно-технической экспертизы.

## Список источников

1. Козлитин А.А., Лебедева В.В., Непочатых И.Н. Развитие пожара от источника зажигания малой мощности // Научный вестник НИИГД МЧС ДНР. 2016. № 4 (53). С. 43–51 с.
2. Экспертное исследование после пожара остатков пенополиуретанов / А.Н. Бесчастных [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2004. № 1. С. 80–86.
3. Зайкина М.И. Методика исследования процессов тлеющего горения материалов при техническом обслуживании, ремонте и эксплуатации автотранспорта: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 146 с. EDN EGISID.
4. Беззапонная О.В., Макаркин С.В., Глухих П.А. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33. № 1. С. 24–35.
5. Возможности методов термического анализа в применении к исследованию кинетики термического разложения полимеров / А.А. Коптелов [и др.] // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. Вып. 9. С. 1163–1169.
6. Исследование пожароопасных свойств полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О.В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2023. № 4 (41). С. 13–23.
7. Thermal Decomposition Kinetics of Rigid Polyurethane Foam and Ignition Risk by a Hot Particle / S.P. Wang [et al.] // J. Appl. Polym. Sci. 2014. № 131. P. 3935.
8. Беззапонная О.В., Хабибова К.И. Применение метода термического анализа при идентификации термопластов и реактопластов в рамках пожарно-технической экспертизы // Техносферная безопасность. 2022. № 1 (34). С. 85–91.
9. McKenna S.T., Hull T.R. The fire toxicity of polyurethane foams // Fire Science Reviews. 2016. № 5:3.
10. Применение термического анализа при исследовании и экспертизе пожаров: методические рекомендации / Е.Д. Андреева [и др.]; под ред. проф. И.Д. Чешко. М.: ВНИИПО МЧС России, 2013. 60 с.
11. Yangui Chen, Hongzhou He, Zhongqing Liu. Application of the global search algorithm to analyze the kinetic mechanism of the thermal decomposition of flexible polyurethane foam // Progress in Reaction Kinetics and Mechanism. 2021. Vol. 46. P. 1–18.
12. Thermal degradation study of pure rigid polyurethane in oxidative and non-oxidative atmospheres / J. He [et al.] // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2016. № 120. P. 269–283.

13. Молчадский О.И. Прогноз пожарной опасности строительных материалов при использовании методов термического анализа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИПО МЧС России, 2001. 22 с.

14. Беззапонная О.В. Определение температуры самовоспламенения веществ и материалов методом синхронного термического анализа // Технологии техносферной безопасности. 2024. Вып. 2 (104). С. 177–187.

15. Broido A.A. Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // Journal of Polymer Science. 1969. Pt. A-2. Vol. 7. № 10. P. 1761–1773.

16. Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs / K. Prasad [et al.] // Polym Test. 2009. № 28.

## References

1. Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Nepochatyh I.N. Razvitie pozhara ot istochnika zazhiganiya maloj moshchnosti // Nauchnyj vestnik NIIGD MCHS DNR. 2016. № 4 (53). S. 43–51 s.

2. Ekspertnoe issledovanie posle pozhara ostatkov penopoluretanov / A.N. Beschastnyh [i dr.] // Pozharovzryvbezopasnost'. 2004. № 1. S. 80–86.

3. Zajkina M.I. Metodika issledovaniya processov tleyushchego goreniya materialov pri tekhnicheskom obsluzhivanii, remonte i ekspluatatsii avtotransporta: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2019. 146 s. EDN EGISID.

4. Bezzaponnaya O.V., Makarkin S.V., Gluhii P.A. Identifikatsiya termoplastichnykh polimerov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // Pozharovzryvbezopasnost'. 2024. T. 33. № 1. S. 24–35.

5. Vozmozhnosti metodov termicheskogo analiza v primenenii k issledovaniyu kinetiki termicheskogo razlozheniya polimerov / A.A. Koptelov [i dr.] // Zhurnal prikladnoj himii. 2016. T. 89. Vyp. 9. S. 1163–1169.

6. Issledovanie požaroopasnykh svoystv polimernykh materialov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza / O.V. Bezzaponnaya [i dr.] // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2023. № 4 (41). S. 13–23.

7. Thermal Decomposition Kinetics of Rigid Polyurethane Foam and Ignition Risk by a Hot Particle / S.P. Wang [et al.] // J. Appl. Polym. Sci. 2014. № 131. P. 3935.

8. Bezzaponnaya O.V., Habibova K.I. Primenenie metoda termicheskogo analiza pri identifikatsii termoplastov i reaktoplastov v ramkah požarno-tekhnicheskoy ekspertizy // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2022. № 1 (34). S. 85–91.

9. McKenna S.T., Hull T.R. The fire toxicity of polyurethane foams // Fire Science Reviews. 2016. № 5:3.

10. Primenenie termicheskogo analiza pri issledovanii i ekspertize požarov: metodicheskie rekomendatsii / E.D. Andreeva [i dr.]; pod red. prof. I.D. Cheshko. M.: VNIPO MCHS Rossii, 2013. 60 s.

11. Yangui Chen, Hongzhou He, Zhongqing Liu. Application of the global search algorithm to analyze the kinetic mechanism of the thermal decomposition of flexible polyurethane foam // Progress in Reaction Kinetics and Mechanism. 2021. Vol. 46. P. 1–18.

12. Thermal degradation study of pure rigid polyurethane in oxidative and non-oxidative atmospheres / J. He [et al.] // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2016. № 120. P. 269–283.

13. Molchadskij O.I. Prognoz požarnoj opasnosti stroitel'nykh materialov pri ispol'zovanii metodov termicheskogo analiza: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: VNIPO MCHS Rossii, 2001. 22 s.

14. Bezzaponnaya O.V. Opredelenie temperatury samovosplamneniya veshchestv i materialov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2024. Vyp. 2 (104). S. 177–187.

15. Broido A.A. Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // Journal of Polymer Science. 1969. Pt. A-2. Vol. 7. № 10. P. 1761–1773.



16. Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs / K. Prasad [et al.] // Polym Test. 2009. № 28.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 11.10.2024; одобрена после рецензирования: 29.10.2024; принята к публикации: 10.11.2024

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 11.10.2024; approved after review: 29.10.2024; accepted for publication: 10.11.2024

*Информация об авторах:*

**Беззапонная Оксана Владимировна**, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), кандидат технических наук, доцент, почётный работник науки и высоких технологий Российской Федерации, e-mail: bezzaponnay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6566-448X>, WOS Research ID R-8727-2019, Scopus Author ID 6504618195, AuthorID: 119257, SPIN-код: 6751-1143

**Глухих Павел Александрович**, старший преподаватель кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), e-mail: pasa.86@mail.ru, Author ID: 814811, <https://orcid.org/0009-0000-9084-8328>, SPIN-код: 8235-9346

**Макаркин Сергей Викторович**, начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22), кандидат юридических наук, доцент, e-mail: mak\_s@e1.ru, Author ID: 374148, <https://orcid.org/0009-0001-8268-5677>, SPIN-код: 8011-4421

*Information about the authors:*

**Bezzaponnaya Oksana V.**, professor of the department of criminalistics and engineering expertise of the Ural institute of State fire service of EMERCOM of Russia (620062, Yekaterinburg, Mira str., 22), candidate of technical sciences, associate professor, honorary worker of science and high technologies of the Russian Federation, e-mail: bezzaponnay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6566-448X>, WOS Research ID R-8727-2019, Scopus Author ID 6504618195, AuthorID: 119257, SPIN: 6751-1143

**Glukhikh Pavel A.**, senior lecturer at the department of criminology and engineering expertise of the Ural institute of State fire service of EMERCOM of Russia (620062, Yekaterinburg, Mira str., 22), e-mail: pasa.86@mail.ru, Author ID: 814811, <https://orcid.org/0009-0000-9084-8328>, SPIN: 8235-9346

**Makarkin Sergey V.**, head of the department of criminalistics and engineering and technical expertise of the Ural institute of State fire service of EMERCOM of Russia (620062, Yekaterinburg, Mira str., 22), candidate of law, associate professor, e-mail: mak\_s@e1.ru, Author ID: 374148, <https://orcid.org/0009-0001-8268-5677>, SPIN: 8011-4421