

Научная статья

УДК 614.841.2001.5: 544.42; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-166-174

## ОЦЕНКА КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

✉ Безапонная Оксана Владимировна.

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

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

*Аннотация.* Возможность возгорания полимерных материалов в условиях пожара зависит от их химической природы и кинетических параметров процесса термоокислительной деструкции в частности, полученных при исследовании материалов в условиях, максимально приближенных к условиям пожара. Изучена кинетика термоокислительной деструкции термопластичных полимеров с разной степенью кристалличности (полипропилен, сотовый поликарбонат, поливинилхлорид, пенополистирол, полиэтилентерефталат) с использованием метода динамической термогравиметрии при скорости нагрева  $20 \text{ }^{\circ}\text{K}\cdot\text{мин}^{-1}$ . Целью исследований являлась оценка возможности применимости метода Брайдо для определения кинетических параметров (энергия активации, предэкспоненциальный множитель, порядок реакции) процесса термоокислительной деструкции для дальнейшей диагностики их возгорания. Результаты исследований показали, что порядок реакций термоокислительной деструкции исследуемых полимеров равен или близок к единице. Для диагностики применимости метода Брайдо к описанию кинетики термоокислительной деструкции полимеров проведена проверка линейности графических зависимостей в заданных координатах. Доказана возможность и целесообразность применения метода Брайдо как простого и надежного при оценке кинетических параметров процесса термоокислительной деструкции полимеров.

*Ключевые слова:* термоокислительная деструкция, термопластичные полимеры, термогравиметрический анализ, энергия активации, вторичные очаги пожара

**Для цитирования:** Безапонная О.В. Оценка кинетических параметров термоокислительной деструкции полимерных материалов для решения задач пожарно-технической экспертизы // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 166–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-166-174.

Scientific article

## EVALUATION OF KINETIC PARAMETERS OF THERMAL-OXIDATIVE DESTRUCTION OF POLYMERIC MATERIALS FOR SOLVING PROBLEMS OF FIRE-TECHNICAL EXPERTISE

✉ Bezaponnaya Oksana V.

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

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

*Abstract.* The possibility of ignition of polymeric materials under fire conditions depends on their chemical nature and kinetic parameters of the thermo-oxidative degradation process obtained in the study of materials under conditions as close as possible to fire conditions. The kinetics of thermo-oxidative degradation of thermoplastic polymers with different degrees of crystallinity (polypropylene, cellular polycarbonate, polyvinyl chloride, polystyrene foam, polyethylene terephthalate) was studied using the dynamic thermogravimetry method at a heating rate of  $20 \text{ }^{\circ}\text{K}\cdot\text{min}^{-1}$ . The aim of the study

was to assess the applicability of the Broydo method for determining the kinetic parameters (activation energy, pre-exponential factor, reaction order) of the thermo-oxidative degradation process for further diagnostics of their ignition. The results of the studies showed that the order of the reactions of thermo-oxidative degradation of the studied polymers is equal to or close to unity. To diagnose the applicability of the Broydo method to the description of the kinetics of the thermo-oxidative degradation of polymers, the linearity of the graphical dependencies in the specified coordinates was checked. The possibility and expediency of using the Broido method as a simple and reliable for assessing the kinetic parameters of the process of thermo-oxidative destruction of polymers has been proven.

**Keywords:** thermal-oxidative destruction, thermoplastic polymers, thermogravimetric analysis, activation energy, secondary fire sources

**For citation:** Bezaponnaya O.V. Evaluation of kinetic parameters of thermal-oxidative destruction of polymeric materials for solving problems of fire-technical expertise // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 166–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-166-174.

## Введение

Полимерные материалы находят все более широкое применение в качестве строительных и отделочных материалов, предметов интерьера и быта. Обладая высокими эксплуатационными характеристиками, подавляющее большинство полимерных материалов представляют высокую пожарную опасность, особенно в случае их плавления, растекания и капания горящих масс в температурных условиях пожара. Так, например, контакт горящих расплавленных масс термопластичных полимеров с горючими материалами вещной обстановки на месте пожара приводит к их возгоранию с формированием вторичных очагов пожара. Поведение полимеров при воздействии высоких температур является определяющим при исследовании причин возникновения пожаров при производстве пожарно-технической экспертизы (ПТЭ). Для исследования полимеров при решении идентификационных и диагностических задач применяются современные высокоточные и информативные инструментальные методы, в частности методы термического анализа [1, 2]. Для эффективности производства ПТЭ необходима разработка методических подходов для решения диагностических задач, сочетающих в себе точность и простоту получения конечного результата.

Оценка возможности возгорания горючих материалов в условиях высоких температур пожара сводится к проверке условия возникновения горения при решении уравнений теплопроводности и диффузии для элементарного объема рассматриваемого материала, в которых используются значения кинетических параметров (порядок реакции, энергия активации, предэкспоненциальный множитель) процесса термоокислительной деструкции (ТОД) горючей нагрузки, в частности, полимерных материалов. Таким образом, для решения задачи по оценке возгорания полимерных материалов в условиях пожара необходимо определить значения их кинетических параметров с использованием современных и высокоточных методов анализа.

Надежным и информативным методом определения кинетики и механизма деструкции веществ и материалов является термогравиметрический (ТГ) метод анализа. В настоящее время разработано и широко применяется множество методов расчета кинетических параметров с использованием экспериментальных данных динамической термогравиметрии [3–5]. Подробное рассмотрение классификации методов расчета кинетических параметров с использованием данных ТГ анализа приведено в работе [6]. Для расчета кинетических параметров используются данные как нескольких термогравиметрических кривых (ТГ-кривых), снятых при разных скоростях нагрева [4], так и данные одной ТГ-кривой [6, 7], что значительно сокращает время расчета.

Необходимо отметить, что кинетика разложения горючих полимерных материалов в большинстве случаев изучается в инертной среде и значительно реже – в окислительной среде воздуха [3, 8]. Кроме этого, кинетические параметры термодеструкции, приводимые в различных публикациях, иногда отличаются более чем на 50 %, что в большей степени обусловлено выбранным методом расчета. Этот факт свидетельствует о том, что вопрос выбора метода расчета кинетических параметров ТОД полимерных материалов до сих пор является открытым, а исследования в этой области актуальными.

Эффективность производства ПТЭ при решении диагностических задач подразумевает использование точных и вместе с тем простых и не трудоемких методов исследования. При этом для получения достоверных результатов условия проведения испытаний исследуемых материалов по возможности должны быть приближены к условиям температурного режима пожара, поскольку макрокинетика и механизм протекания термодеструкции полимеров зависит от скорости нагрева. В связи с этим, выбор адекватного метода расчета кинетических параметров ТОД полимеров методом ТГ анализа в условиях, приближенных к реальным условиям пожара, является актуальной и важной задачей.

Анализ работ [7, 9], в которых рассматривается оценка кинетических параметров процесса ТОД полимеров показал, что наиболее простым в использовании и достаточно точным для решения прикладных задач является метод, предложенный Бройдо [10], где кинетические параметры определяются с использованием результатов динамической термогравиметрии при одной скорости нагрева. Данный метод с тех пор получил свое развитие и применяется для оценки срока службы (долговечности) полимеров.

Целью работы является оценка возможности применения метода Бройдо для определения кинетических параметров процесса ТОД полимеров с целью дальнейшей диагностики возможности их возгорания в условиях пожара.

Процесс термодеструкции материалов с использованием данных ТГ анализа и дифференциальной термогравиметрии описывается уравнением вида:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha),$$

где  $k(T)$  – константа скорости реакции;  $f(\alpha)$  – кинетическая функция, зависящая от механизма деструкции материала;  $\alpha$  – конверсия, определяемая выражением:

$$\alpha = (m_0 - m)/(m_0 - m_\infty),$$

где  $m_0$ ,  $m$  и  $m_\infty$  – начальная, текущая и конечная масса образца.

Константа скорости реакции определяется в соответствии с уравнением Аррениуса:

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}},$$

где  $E_a$  – энергия активации термической деструкции полимера;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $A$  – предэкспоненциальный множитель;  $T$  – температура.

Расчеты кинетических параметров методом Бройдо [10] с использованием данных ТГ-кривой основаны на уравнении формальной кинетики:

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

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 для реакций деструкции полимеров, позволяет преобразовать уравнение (1) с учетом (2) к уравнению вида:

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

ТГ кривая реакции деструкции полимера представляет собой это уравнение, проинтегрированное по температуре  $T$  [10].

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, %.

Рассмотрим возможность применения подхода, предложенного Бройдо, для определения кинетических параметров ТОД термопластичных полимеров.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились методом синхронного термического анализа на приборе Netzscht STA 449 F5 Jupiter (Германия) в среде воздуха с расходом продувочного газа  $80 \text{ мл} \cdot \text{мин}^{-1}$  в корундовых тиглях. Для приближения к температурным условиям пожара была выбрана скорость нагрева  $20 \text{ К} \cdot \text{мин}^{-1}$ . Исследовались образцы термопластичных полимеров с разной степенью кристалличности (полипропилен (ПП), поливинилхлорид (ПВХ), пенополистирол (ППС), сотовый поликарбонат (ПК) и полиэтилентерефталат (ПЭТ). Масса образцов составляла 5–6 мг. Форма образцов: пластина толщиной 0,3–0,5 мм.

### Результаты исследований и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований образцов полимерных материалов получены ТГ-кривые (рис. 1.) Для обработки полученных термограмм использовалось программное обеспечение NETZSCH Proteus 6.1.

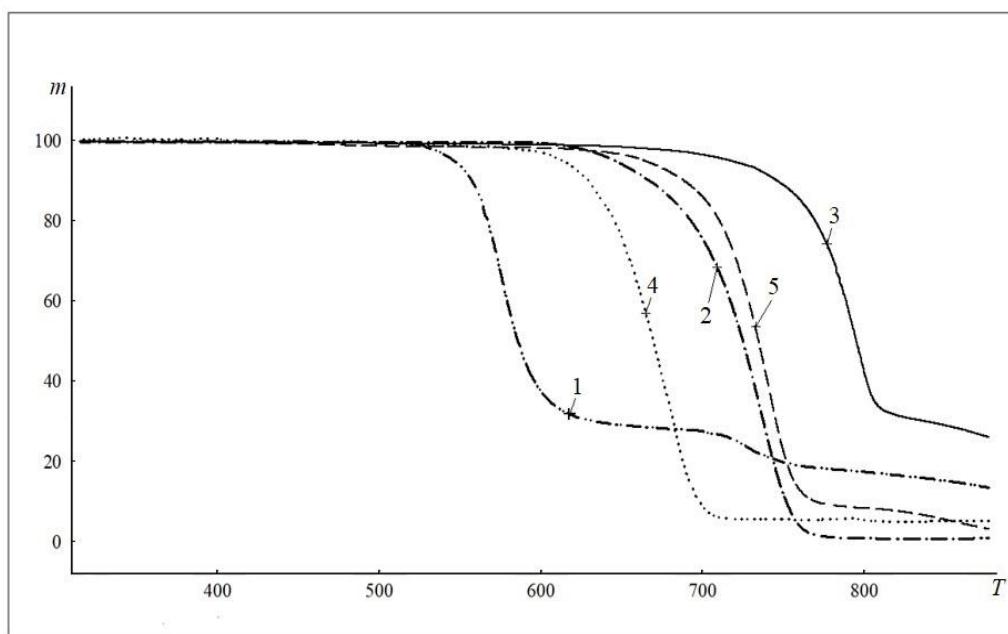


Рис. 1. Термогравиметрические кривые процесса термоокислительной деструкции термопластичных полимерных материалов: 1 – ПВХ; 2 – ПП; 3 – ПК; 4 – ППС; 5 – ПЭТ

Анализ ТГ-кривых свидетельствует о том, что процесс ТОД исследуемых полимеров протекает достаточно интенсивно в узком интервале температур ( $\Delta T = 60\text{--}90\text{ K}$ ). Скорость потери массы исследуемых полимеров превышает  $30\text{ \%}\cdot\text{мин}^{-1}$ . Наибольшей скоростью потери массы характеризуются ПВХ и ПЭТ (табл. 1).

Таблица 1

### Максимальная скорость потери массы полимеров при ТОД

Полимер	Температура при максимальной скорости потери массы $T$ , К	Максимальная скорость потери массы, $V_{\max}$ , %·мин $^{-1}$
ПВХ	575,5	37,26
ПП	736,1	32,87
ПК	791,6	33,47
ППС	680,9	34,60
ПЭТ	737,3	37,72

Термолиз исследуемых термопластов протекает в одну стадию, за исключением ПВХ, где термолиз полимера включает две стадии (две ступени на ТГ-кривой), что подтверждается данными дифференциальной термогравиметрии. Наибольшей термической стабильностью из исследуемых полимеров характеризуется ПК.

Одним из важных кинетических параметров, характеризующих механизм протекания реакции, является порядок реакции  $n$ . В методе Брайдо [8] используется допущение, согласно которому реакции разложения полимеров в основном являются реакциями первого порядка ( $n = 1$ ). Для доказательства этой гипотезы проверена линейность зависимости логарифма скорости потери массы  $\lg V$  от логарифма потери массы  $\lg \Delta m$  (рис. 2).

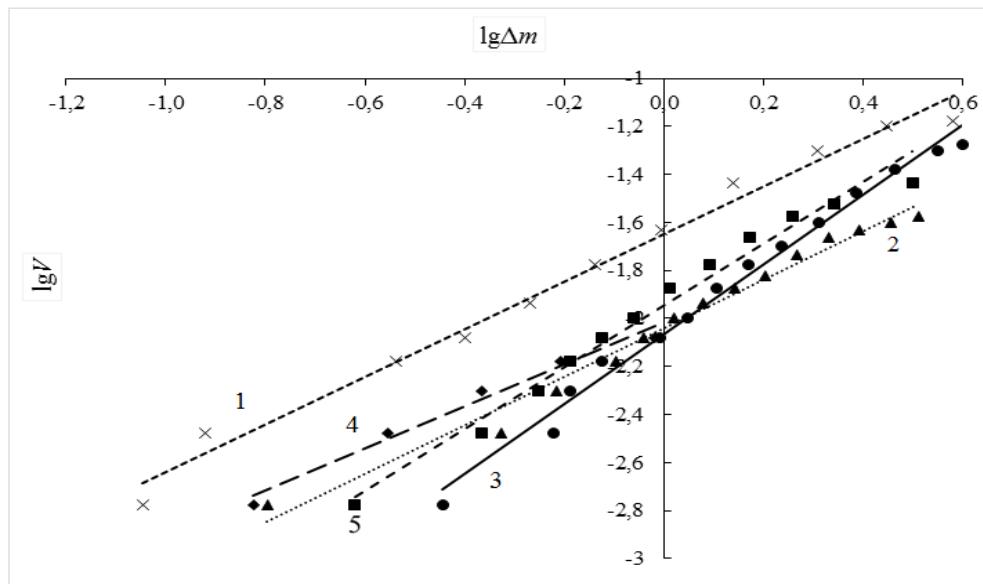


Рис. 2. Графические зависимости логарифма скорости потери массы от логарифма потери массы образцов полимерных материалов:  
1 – ПВХ; 2 – ПП; 3 – ПК; 4 – ППС; 5 – ПЭТ

Полученные зависимости описываются уравнением прямой с высокими значениями коэффициентов детерминации (табл. 2), что подтверждает гипотезу Брайдо о порядке реакции  $n = 1$ . Тангенс угла наклона прямых характеризует порядок реакций ТОД исследуемых полимеров (табл. 2). Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что он, за исключением сотового ПК, равен или близок к единице, что также подтверждает

гипотезу Брайдо. Отличие порядка реакции ТОД ПК от единицы, вероятнее всего, связано с особенностями структуры сотового ПК и, как следствие, более сложным механизмом протекания процесса ТОД.

Для проведения расчетов энергии активации  $E_a$  по ТГ-кривым определялись значения потери массы ( $\Delta m$ , %) с шагом 5 К 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 исследуемых полимеров приведены на рис. 3.

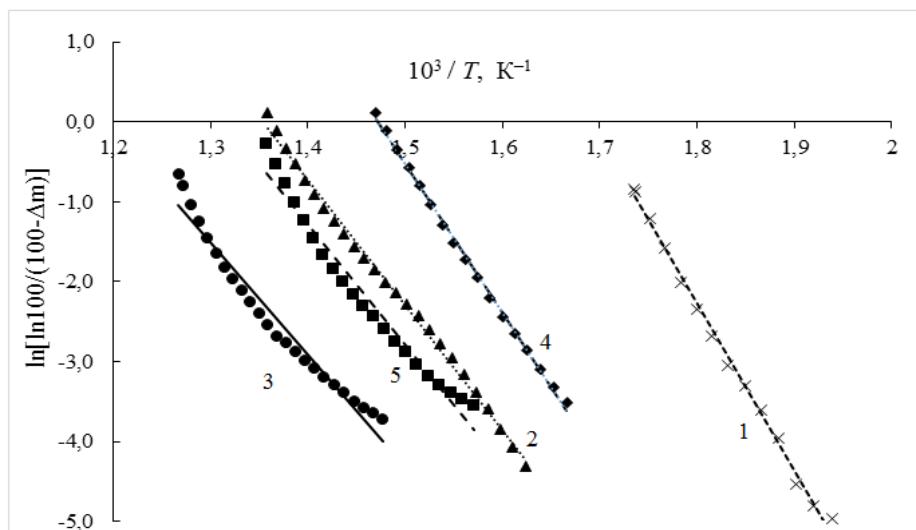


Рис. 3. Графические зависимости  $\ln \left[ \ln \frac{100}{100 - \Delta m} \right]$  от обратной температуры:  
1 – ПВХ; 2 – ПП; 3 – ПК; 4 – ППС; 5 – ПЭТ

Полученные зависимости описываются уравнением прямой с высокими значениями коэффициентов детерминации (табл. 2), что свидетельствует о выборе адекватной модели для описания кинетики протекания процесса ТОД полимеров.

Значение эффективной энергии активации  $E_a$  рассчитывается по формуле:

$$E_a = R \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\operatorname{tg} \alpha$  – 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  $A$ . Полученные значения  $E_a$  и  $A$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Кинетические параметры процесса термоокислительной деструкции термопластичных полимеров при скорости нагрева  $20 \text{ К}\cdot\text{мин}^{-1}$   
( $R^2$  – коэффициент детерминации для линейной линии тренда)**

Полимер	$n$	$R^2$	$A, \text{с}^{-1}$	$E_a, \text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$	$R^2$	$E_a, \text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$
ПВХ	1,0	0,9872	$1,2 \cdot 10^{13}$	173,7	0,9956	160 [11]–197 [6]
ПП	1,0	0,9841	$5,4 \cdot 10^6$	130,5	0,9961	133 [11]
ПК	1,4	0,9888	$1,1 \cdot 10^5$	117,2	0,9633	113,8 [12]
ППС	0,9	0,9796	$5,5 \cdot 10^9$	154,6	0,9979	73,8–166,3 [13]
ПЭТ	1,2	0,9809	$1,8 \cdot 10^6$	125,5	0,9705	120 [14]

Самые высокие значения энергии активации и предэкспоненциального множителя получены для ПВХ, что свидетельствует о его меньшей склонности к возгоранию.

Высокие значения коэффициентов детерминации для линейной линии тренда свидетельствуют о возможности принятия допущения о порядке реакции  $n = 1$  и о выборе адекватной модели для описания кинетики протекания процесса ТОД полимеров. Рассчитанные значения энергии активации хорошо согласуются с данными из литературных источников, что свидетельствует о достоверности полученных данных и возможности применения метода Бройдо для оценки кинетических параметров процесса ТОД полимеров. Для расчетов использовали данные ТГ анализа при скорости нагрева  $20 \text{ К}\cdot\text{мин}^{-1}$ , в отличие от обычно применяемых  $5 \text{ К}\cdot\text{мин}^{-1}$  или  $10 \text{ К}\cdot\text{мин}^{-1}$ , что позволило приблизить условия испытаний к более реальным условиям пожара и получить более достоверные сведения о кинетике протекания процессов деструкции полимеров в среде воздуха.

### **Заключение**

В результате исследований термопластичных полимеров (ПП, сотовый ПК, ПВХ, ППС, ПЭТ) методом динамической ТГ при скорости нагрева  $20 \text{ К}\cdot\text{мин}^{-1}$  получены термоаналитические характеристики процесса их ТОД. Приближение условий проведения испытаний полимеров к реальным условиям пожара позволило повысить достоверность полученных результатов. Для диагностики применимости метода Бройдо к описанию кинетики ТОД полимеров проведена проверка линейности графических зависимостей в заданных координатах. Рассчитанные значения энергии активации хорошо согласуются с данными из литературных источников, что свидетельствует о достоверности полученных данных и возможности применения метода Бройдо как простого и надежного для оценки кинетических параметров процесса ТОД полимеров с целью дальнейшей диагностики возможности их возгорания в условиях пожара.

Возможность проведения испытаний только при одной скорости нагрева позволит оптимизировать процесс производства ПТЭ, сократив время, и тем самым повысить ее эффективность. Наличие базы данных по кинетическим параметрам полимеров поможет экспертам проводить оценку возможности их возгорания в условиях пожара с формированием вторичных очагов пожара.

### **Список источников**

1. Беззапонная О.В., Макаркин С.В., Глухих П.А. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33. № 1. С. 24–35.
2. Беззапонная О.В. Определение температуры самовоспламенения веществ и материалов методом синхронного термического анализа // Технологии техносферной безопасности. 2024. № 2 (104). С. 177–187.
3. Charde S., Sonawane S., Sonawane S. Degradation kinetics of polycarbonate composites // Chem. Biochem. Eng. Q. 2018. № 32 (2). P. 151–165.
4. Predictions of polymer thermal degradation: relevance of selecting the proper kinetic model / P.E. Sánchez-Jiménez [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. № 147 (3). P. 1–7.
5. Characterisation of pyrolysis kinetics and detailed gas species formations of engineering polymers via reactive molecular dynamics / T.B.Yu. Chen [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2021. Vol. 153. P. 104931.
6. Simple direct method to obtain kinetic parameters for polymer thermal decomposition / D. Lázaro [et al.] // Appl. Sci. 2021. № 11. P. 11300.
7. Лобова С.Ф., Принцева М.Ю. Оценка влияния исходных данных на результаты моделирования распространения горения при оценке эффективности работы автоматической установки пожарной сигнализации // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2019. № 3. С. 70–80.

8. Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air / T. Fateh [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2016. Vol. 120. P. 423–433.
9. 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.
10. 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.
11. Галузо О.Г., Эксанова С.Ш. Долговечность изделий для инженерно-технических систем в строительстве // Журнал Механика и технология. 2022. № 1 (6). С. 203–207.
12. Новый подход к анализу инициированной термодеструкции поликарбоната / А.В. Куценова [и др.] // Химическая физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 74–80.
13. Закономерности термоокислительной деструкции полистирольной теплоизоляции пониженной горючести / А.А. Кобелев [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 74–80.
14. Wellen R.M., Canedo E.L. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET // Polymer Testing. 2014. № 40. P. 33–38.

## References

1. Bezzaponnaya O.V., Makarkin S.V., Gluhih P.A. Identifikasiya termoplastichnyh polimerov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // Pozharovzryvobezopasnost'. 2024. Т. 33. № 1. С. 24–35.
2. Bezzaponnaya O.V. Opredelenie temperatury samovosplameneniya veshchestv i materialov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2024. № 2 (104). С. 177–187.
3. Charde S., Sonawane S., Sonawane S. Degradation kinetics of polycarbonate composites // Chem. Biochem. Eng. Q. 2018. № 32 (2). Р. 151–165.
4. Predictions of polymer thermal degradation: relevance of selecting the proper kinetic model / P.E. Sánchez Jiménez [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. № 147 (3). P. 1–7.
5. Characterisation of pyrolysis kinetics and detailed gas species formations of engineering polymers via reactive molecular dynamics / T.B.Yu. Chen [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2021. Vol. 153. P. 104931.
6. Simple direct method to obtain kinetic parameters for polymer thermal decomposition / D. Lázaro [et al.] // Appl. Sci. 2021. № 11. P. 11300.
7. Lobova S.F., Princeva M.Yu. Ocenna vliyanija iskhodnyh dannyh na rezul'taty modelirovaniya rasprostraneniya goreniya pri ocenke effektivnosti raboty avtomaticheskoy ustanovki pozharnoj signalizacii // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2019. № 3. С. 70–80.
8. Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air / T. Fateh [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2016. Vol. 120. P. 423–433.
9. Vozmozhnosti metodov termicheskogo analiza v primenenii k issledovaniyu kinetiki termicheskogo razlozheniya polimerov / A.A. Koptelov [i dr.] // Zhurnal prikladnoj himii. 2016. Т. 89. Вып. 9. С. 1163–1169.
10. 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.
11. Galuzo O.G., Eksanova S.Sh. Dolgovechnost' izdelij dlya inzhenerno-tehnicheskikh system v stroitel'stve // Zhurnal Mekhanika i tekhnologiya. 2022. № 1(6). С. 203–207.
12. Novyj podhod k analizu iniciirovannoj termodestrukciii polikarbonata / A.V. Kucenova [i dr.] // Himicheskaya fizika. 2020. Т. 39. № 12. С. 74–80.

13. Zakonomernosti termookislitel'noj destrukcii polistirol'noj teploizolyacii ponizhennoj goryuchesti / A.A. Kobelev [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvratshchenie, likvidaciya. 2018. № 2. S. 74–80.

14. Wellen R.M., Canedo E.L. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET // Polymer Testing. 2014. № 40. P. 33–38.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 23.10.2024; одобрена после рецензирования: 31.01.2025; принята к публикации: 21.02.2025

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 23.10.2024; approved after review: 31.01.2025; accepted for publication: 21.02.2025

*Информация об авторе*

**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>, SPIN-код: 6751-1143

*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>, SPIN: 6751-1143