

## Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа

Оксана Владимировна Беззапонная ✉, Сергей Викторович Макаркин, Павел Александрович Глухих

Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Представлены результаты исследования термопластичных полимерных материалов различной химической природы (полиэтилен высокой плотности, поликарбонат, поливинилхлорид), способных при воздействии высоких температур пожара плавиться, растекаться, гореть и капать, формируя вторичные очаги пожара. Обоснована актуальность применения высокоточного и информативного метода синхронного термического анализа для определения химической природы полимеров вещной обстановки пожара.

**Цели и задачи.** Целью исследования являлась оценка возможности применения метода синхронного термического анализа для идентификации полимерных материалов с разной степенью термического воздействия на них при диагностике формирования вторичных очагов пожара в рамках пожарно-технической экспертизы. Для достижения цели решены следующие задачи: определены термоаналитические характеристики для идентификации полукристаллических термопластов в нативном состоянии, подверженных высокотемпературному воздействию пожара; определены термоаналитические характеристики для идентификации аморфных полимерных материалов с разной степенью термического воздействия на них.

**Методы.** При исследовании применялся метод синхронного термического анализа, включающий в себя: термогравиметрический анализ, дифференциальную термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию. Приведен пример совмещения метода синхронного термического анализа с методом квадрупольной масс-спектрометрии для решения задачи идентификации термопластов.

**Результаты.** Изучены закономерности термической и термоокислительной деструкции полимерных материалов. Рассмотрена методология идентификации термопластов методом синхронного термического анализа. Установлено, что для полимеров с температурой воздействия до 300 °С значимую информацию о химической природе полимера дают значения температур фазовых переходов (плавления, стеклования, термо- (термоокислительной) деструкции). Определение химической природы термопластов с высокой степенью выгорания возможно только при наличии экстремумов на кривых дифференциальной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии в высокотемпературном интервале термолиза полимеров. Показана возможность идентификации термопластов при совмещении термического анализа с масс-спектрометрией.

**Выводы.** Анализ результатов исследований показал, что значимыми термоаналитическими характеристиками для идентификации полукристаллических термопластов являются температура плавления и температура максимальной скорости потери массы процесса термо- или термоокислительной деструкции полимера. Для аморфных термопластов — температура стеклования и температура термо- или термоокислительной деструкции полимера.

**Ключевые слова:** вторичные очаги пожара; температура плавления; температура стеклования; температура термоокислительной деструкции полимера; пожарно-техническая экспертиза

**Для цитирования:** Беззапонная О.В., Макаркин С.В., Глухих П.А. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 24–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35

✉ Беззапонная Оксана Владимировна, e-mail: bezzaponnay@mail.ru

## Identification of thermoplastic polymers by method of synchronous thermal analysis

Oksana V. Bezzaponnaya ✉, Sergey V. Makarkin, Pavel A. Glukhikh

Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation

**ABSTRACT**

**Introduction.** The results of research of thermoplastic polymeric materials of different chemical nature (high-density polyethylene, polycarbonate, polyvinyl chloride), capable of melting, spreading, burning and dripping when exposed to high fire temperatures, forming secondary fire centers, are presented. The relevance of application of a highly accurate and informative method of synchronous thermal analysis to determine the chemical nature of polymers in fire conditions is substantiated.

**Goals and objectives.** The purpose of the research was to assess the possibility of application of the method of synchronous thermal analysis to identify polymeric materials with different degree of thermal impact on them when diagnosing the formation of secondary fires within the framework of fire-technical expertise.

To achieve the goal, the following tasks were solved: thermoanalytical characteristics to identify semi-crystalline thermoplastics in the native state and exposed to high-temperature effects of fire were determined; thermoanalytical characteristics to identify amorphous polymeric materials with different degrees of thermal impact on them were determined.

**Methods.** The method of synchronous thermal analysis, including: thermogravimetric analysis, differential thermogravimetry and differential scanning calorimetry was used in the study. An example of combining the method of synchronous thermal analysis with the method of quadrupole mass spectrometry to solve the problem of identification of thermoplastics is presented.

**Results.** The regularities of thermal and thermo-oxidative degradation of polymeric materials were studied. The methodology of identification thermoplastics by the method of synchronous thermal analysis is considered. It was established that for polymers with exposure temperatures up to 300 °C, significant information about the chemical nature of the polymer is provided by the values of phase transition temperatures (melting, glass transition, thermal (thermo-oxidative) degradation). Determination of the chemical nature of thermoplastics with a high degree of burn-up is possible only in the presence of extrema in the curves of differential thermogravimetry and differential scanning calorimetry in the high-temperature range of polymer thermolysis. The possibility of identification of thermoplastics by combining thermal analysis with mass spectrometry is demonstrated.

**Conclusions.** The analysis of research results has shown that the significant thermoanalytical characteristics for identification of semi-crystalline thermoplastics are the melting temperature and the temperature of the maximum mass loss rate of the process of thermal or thermo-oxidative degradation of the polymer. For amorphous thermoplastics – the glass transition temperature and the temperature of thermo-oxidative degradation of the polymer.

**Keywords:** secondary fires; melting point, glass transition temperature; temperature of thermo-oxidative degradation of polymer; fire-technical expertise

**For citation:** Bezzaponnaya O.V., Makarkin S.V., Glukhikh P.A. Identification of thermoplastic polymers by method of synchronous thermal analysis. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):24-35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35 (rus).

✉ Oksana Vladimirovna Bezzaponnaya, e-mail: bezzaponnay@mail.ru

**Введение**

При производстве пожарно-технической экспертизы (ПТЭ) одной из основных задач, решаемых экспертами, является определение местонахождения очага пожара. При реконструкции пожара и путей его распространения необходимо рассматривать возможность формирования вторичных очагов пожара (ВОП), например, при плавлении и растекании (капании) горящих масс термопластичных полимерных материалов. Примером развития пожара по причине капания горящих масс термопластичного полимерного материала является пожар в ТРЦ «Зимняя вишня» в Кемерове.

При диагностике возможности формирования ВОП перед экспертом ставится вопрос о способности полимерного материала переходить в пластическое состояние, течь, гореть, капать. На первом этапе производства ПТЭ решается задача по определению химической природы полимера, которая усложняется тем, что термопластичные полимеры характеризуются разной степенью кристалличности и провести, например, идентификацию аморфных термопластов по температуре стеклования в некоторых случаях не представляется возможным. Помимо этого, при воз-

действии высоких температур пожара, в большинстве случаев, полимер практически весь выгорает, и задача по его идентификации еще более усложняется.

Для определения химической природы полимеров целесообразно применять современные инструментальные методы, в частности высокоточный (погрешность не превышает 3 %) и информативный метод синхронного термического анализа (СТА). Данный метод позволяет определять температуры плавления полукристаллических полимеров, температуры стеклования аморфных полимеров, тепловые эффекты фазовых переходов. По мнению авторов статьи [1], определить химическую природу полимера можно по значениям энергии активации процесса термоокислительной деструкции полимеров с использованием метода СТА, однако для подтверждения данной гипотезы необходимы дополнительные исследования, поскольку в большинстве случаев у образцов полимеров с мест пожара процесс термоокислительной деструкции уже практически завершен, а идентификационные признаки утрачены.

В настоящее время уже накоплен значительный материал по результатам экспериментальных исследований полимерных материалов методами

термического анализа, в том числе: для оценки термической стабильности полимеров [2–4]; по определению температур фазовых переходов [5, 6], анализа окислительно-деструктивных процессов [7–9]; оценки пожароопасных свойств полимеров [10, 11], исследованию кинетики термо- и термоокислительной деструкции полимеров [12–14], идентификации полимеров и композитов на их основе [15, 16], а также для решения задач пожарно-технической экспертизы [17, 18], в частности идентификационных задач [19, 20].

Идентификацию термопластов обычно проводят по значениям температур плавления полимеров, однако данная характеристика не может быть единственной ввиду разной степени кристалличности и аморфной природы полимеров, а также ввиду невозможности ее определения для образцов полимеров с высокой степенью выгорания. В связи с этим актуальны исследования по определению значимых термоаналитических характеристик, которые можно использовать для определения химической природы термопластичных полимеров различной химической природы и с разной степенью термического воздействия на них.

В связи с вышесказанным, целью исследований являлась оценка возможности применения метода СТА для идентификации полимерных материалов с разной степенью термического воздействия на них при диагностике формирования вторичных очагов пожара. Для достижения цели ставились задачи по определению термоаналитических характеристик полукристаллических и аморфных термопластов в нативном состоянии, подверженных высокотемпературному воздействию с использованием метода СТА, по которым можно определить химическую природу полимеров с мест пожаров.

### Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны самые распространенные полимеры как в быту, так и используемые при производстве строительных и отделочных материалов: полиэтилен (ПЭ) высокой плотности, поликарбонат (ПК) и поливинилхлорид (ПВХ).

Исследования полимеров различной химической природы проводились методом СТА на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter в инертной среде азота, а также в среде воздуха с расходом газа 75 мл/мин, в корундовых тиглях, в динамических условиях со скоростью нагрева 20 °С/мин. Масса навесок исследуемых полимеров составляла 5–6 мг. Конечная температура исследований составляла 900 °С.

Перед проведением термического анализа образцов полимерных материалов проводилось их кондиционирование в течение трех суток. Для термического анализа термопластов с высокой степенью

выгорания образцы полимеров предварительно подвергались высокотемпературному воздействию до 600 °С при скорости нагрева 20 °С/мин с дальнейшим их кондиционированием.

Для определения термоаналитических характеристик исследуемых термопластов термограммы обрабатывались с использованием программного обеспечения Proteus 6.1.

Для получения дополнительных сведений при определении химической природы полимеров применялся метод квадрупольной масс-спектрометрии при совмещении его с методом СТА. Исследования проводились на квадрупольном масс-спектрометре Netzsch QMS 403 D Aełos®.

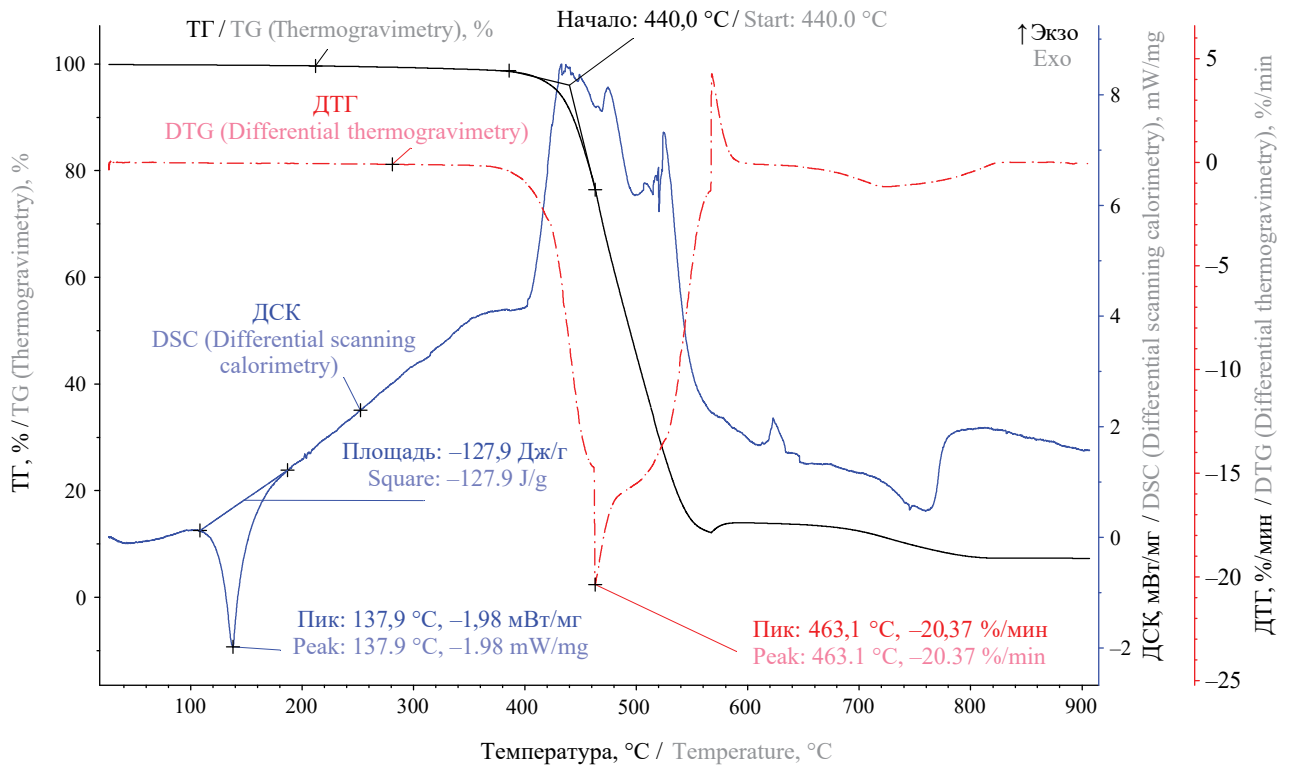
### Результаты исследования и их обсуждение

Определение значимых термоаналитических характеристик термической и термоокислительной деструкции термопластичных полимеров проводилось на основе анализа кривых термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) полученных термограмм. Термоаналитическая характеристика является значимой только в том случае, если по ней можно установить идентичность исследуемого материала. В качестве значимых идентификационных характеристик в термическом анализе может выступать потеря массы веществом при заданной температуре, температуры максимумов ДТГ или ДСК пиков, зольный или коксовый остаток и т.д. Для определения значимых идентификационных характеристик необходимо изучение закономерностей термолитиза исследуемых материалов.

Термограмма ПЭ высокой плотности в инертной среде азота представлена на рис. 1.

Анализ ТГ и ДТГ кривых ПЭ свидетельствует о значительной потере массы в интервале 400–580 °С. Термодеструкция ПЭ начинается при температуре 440,0 °С. Максимальная скорость потери массы составила 20,37 %/мин при температуре 463,1 °С.

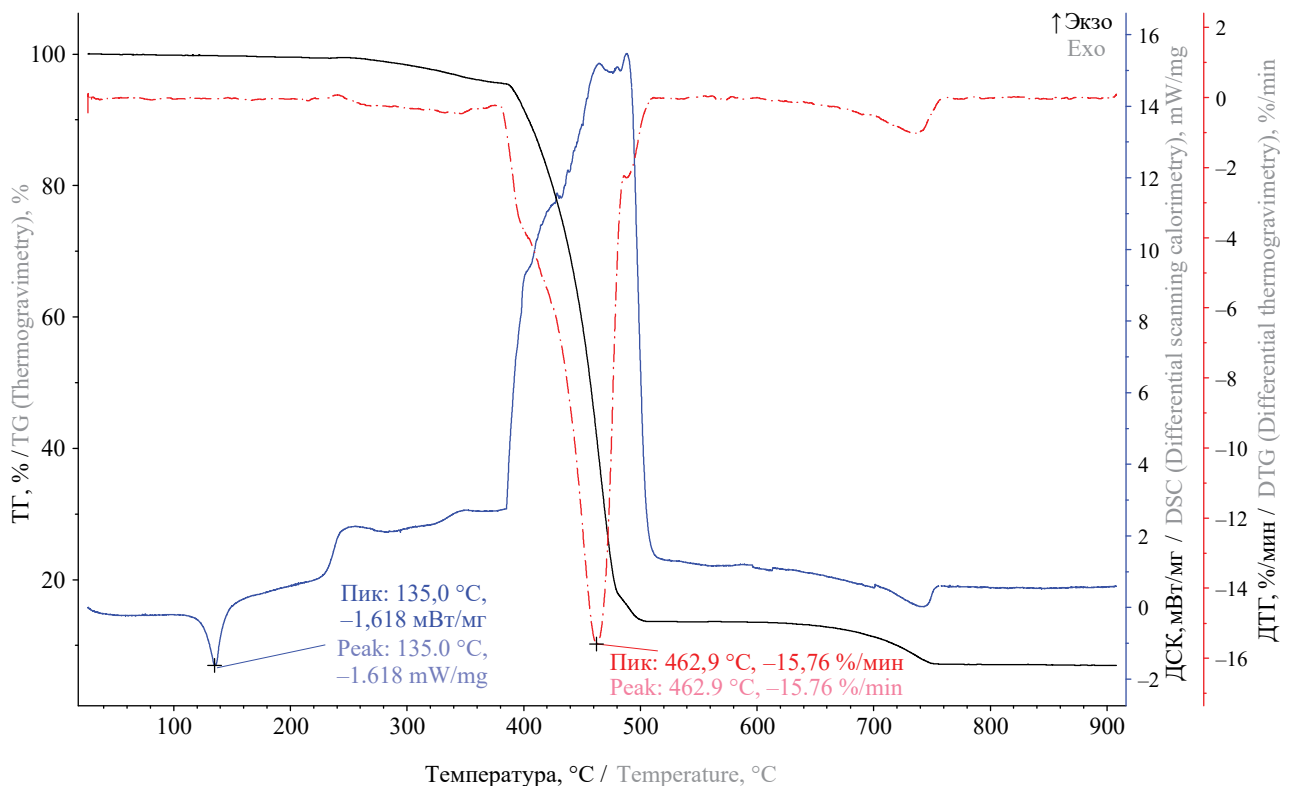
На ДСК кривой в интервале температур 100–200 °С присутствует ярко выраженный эндотермический пик, свидетельствующий о плавлении полимера, что позволяет диагностировать его термопластичность и способность растекаться и капать с формированием ВОП. Температура плавления полимеров определяется по температуре максимума пика плавления и для исследуемого ПЭ составила 137,9 °С. По данной термоаналитической характеристике представляется возможным проводить идентификацию термопластичных полимеров с высокой степенью кристалличности, однако при этом необходимо учитывать, что наличие добавок наполнителей в составе полимера может привести



**Рис. 1.** Термограмма полиэтилена высокой плотности в атмосфере азота  
**Fig. 1.** Thermogram of high-density polyethylene in a nitrogen atmosphere

к изменению температуры плавления на несколько градусов. Теплота плавления исследуемого ПЭ высокой плотности составила 127,9 Дж/г. Степень

кристалличности, рассчитанная известным методом с использованием теплоты плавления ПЭ со 100 % кристалличностью, составила 43,5 %.



**Рис. 2.** Термограмма полиэтилена высокой плотности в атмосфере воздуха  
**Fig. 2.** Thermogram of high-density polyethylene in air atmosphere

Исследование образцов ПЭ было также проведено и в окислительной среде воздуха для получения термоаналитических характеристик термоокислительной деструкции данного полимера (рис. 2).

Температура плавления ПЭ в среде воздуха составила 135,0 °С, чуть ниже значения температуры плавления, полученного в инертной среде. Максимальная скорость потери массы у ПЭ (температура термоокислительной деструкции) достигается при температуре 462,9 °С. Данная термоаналитическая характеристика значимо характеризует процесс термоокислительной деструкции ПЭ высокой плотности и вместе с температурой плавления может быть использована для его идентификации в нативном состоянии или незначительно подверженного тепловому воздействию (до температур 300–350 °С).

Наличие экзотермического пика в интервале температур 360–550 °С на кривой ДСК в окислительной среде воздуха свидетельствует о его способности к горению и распространению пламени.

Идентификационной характеристикой нативных образцов полимеров, или в незначительной степени (до 300–350 °С) подверженных термическому воздействию, по мнению авторов статьи, может выступать также энергия активации процесса их термоокислительной деструкции, которая рассчитывается по результатам ТГ анализа.

Определение химической природы полимеров, подверженных термическому воздействию в условиях пожара, значительно усложняется ввиду протекания процесса термоокислительной деструкции и стирания идентификационных признаков. Для решения этой задачи необходимы сведения о термолитизе полимеров после предварительного температурного воздействия на них. Термограмма ПЭ в среде воздуха после предварительного теплового воздействия в динамических условиях повышения температуры до 600 °С представлена на рис. 3.

Пик плавления на ДСК кривой отсутствует, и определить химическую природу полимера с использованием данной термоаналитической характеристики не представляется возможным. Ярко выраженные ДТГ и ДСК пики в интервале температур 700–800 °С, обусловленные, вероятнее всего, наполнением данного полимера карбонатом кальция (мелом), также не могут являться критериями для идентификации ПЭ. Значимой идентификационной характеристикой данного полимера может выступать экзотермический пик на ДСК кривой с максимумом при температуре 672,5 °С, характеризующий процесс завершения термоокислительной деструкции ПЭ. Таким образом, в случае воздействия на термопластичные полимерные материалы высоких температур пожара (до 600 °С) сохранившиеся ДСК и/или ДТГ пики

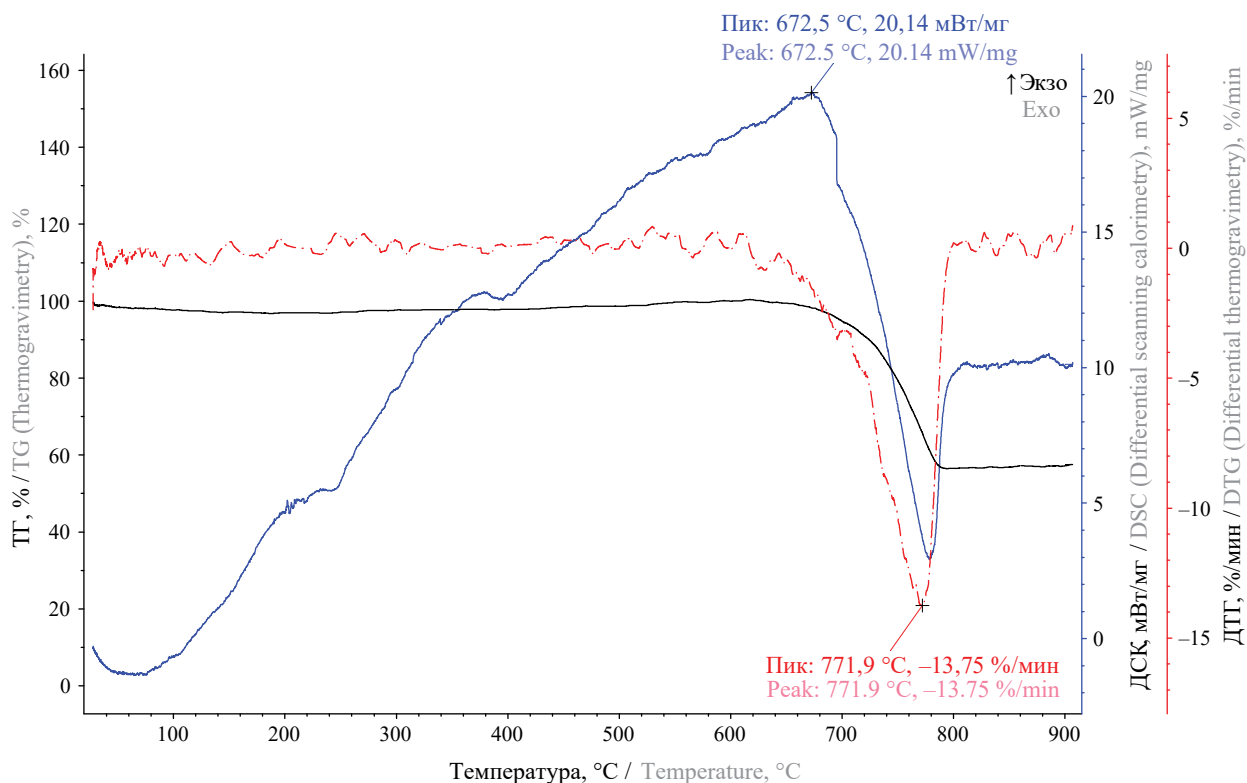
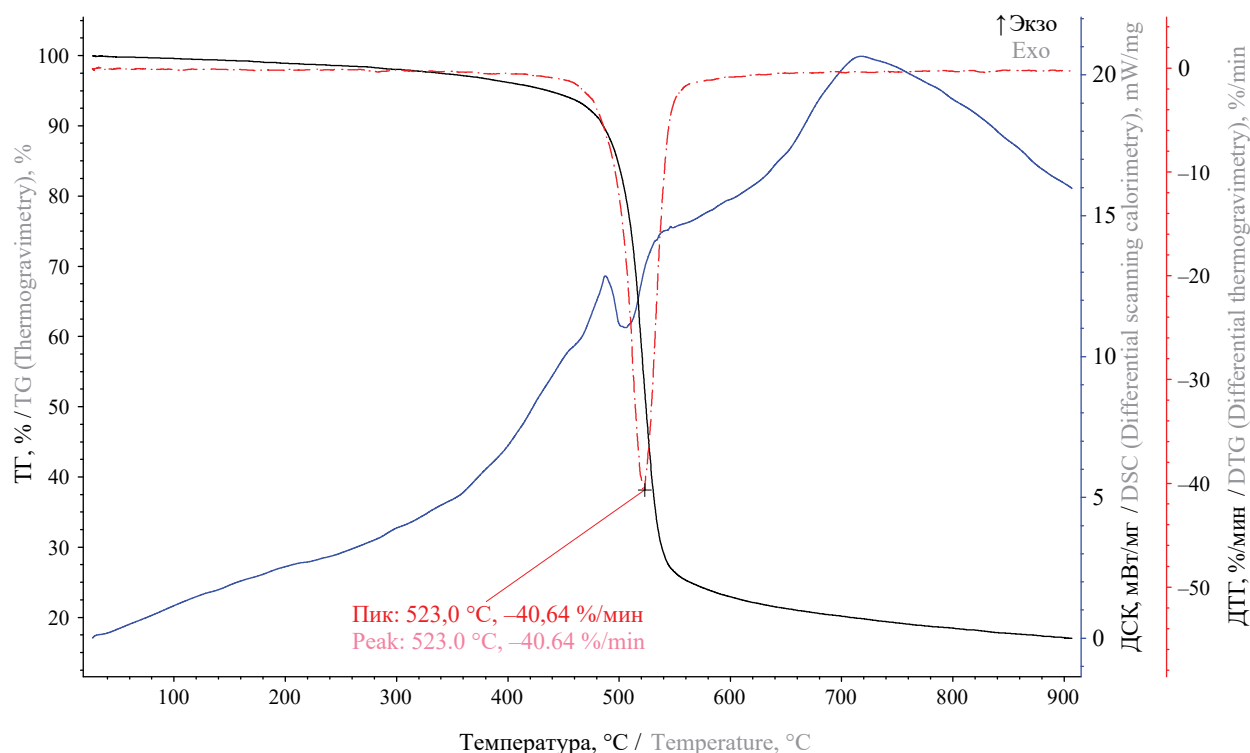


Рис. 3. Термограмма ПЭ в среде воздуха после предварительного температурного воздействия ( $T = 600$  °С)  
Fig. 3. Thermogram of PE in air after preliminary temperature exposure ( $T = 600$  °С)



**Рис. 4.** Термограмма поликарбоната в среде азота  
**Fig. 4.** Thermogram of polycarbonate in nitrogen environment

будут способствовать определению их химической природы. Необходимо только наличие в арсенале эксперта базы термограмм полимеров после высоко-температурного воздействия на них.

Рассмотрим термолиз аморфного термопластичного полимера на примере ПК. Термограмма ПК в инертной среде азота представлена на рис. 4.

Термодеструкция ПК начинается при температуре 490,2 °С, а максимальная скорость потери массы (40,64 %) наблюдается при температуре 523 °С. Температура максимума ярко выраженного ДТГ пика (температура термодеструкции) может выступать в качестве значимой термоаналитической характеристики для идентификации данного полимера. Для детального изучения ДСК кривой использовали прием масштабирования (рис. 5).

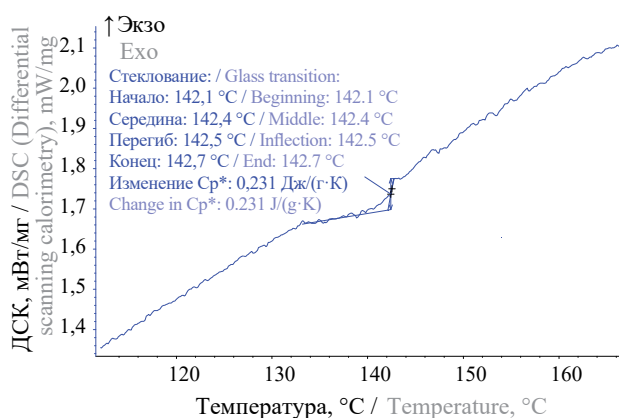
После масштабирования кривой ДСК в интервале температур 142,1–142,7 °С наблюдается ступенька, характеризующая процесс стеклования полимера, что позволяет отнести его к термопластичным аморфным полимерам. Температура стеклования составила 142,4 °С и позволила квалифицировать полимер как ПК. То есть данный полимер при температурах выше 142,4 °С находится в текучем состоянии и при возгорании в температурных условиях пожара способен течь, капать, формируя ВОП.

Наличие ДТГ и ДСК пиков на термограмме ПК, полученной в окислительной среде воздуха (рис. 6) после предварительного теплового воздействия

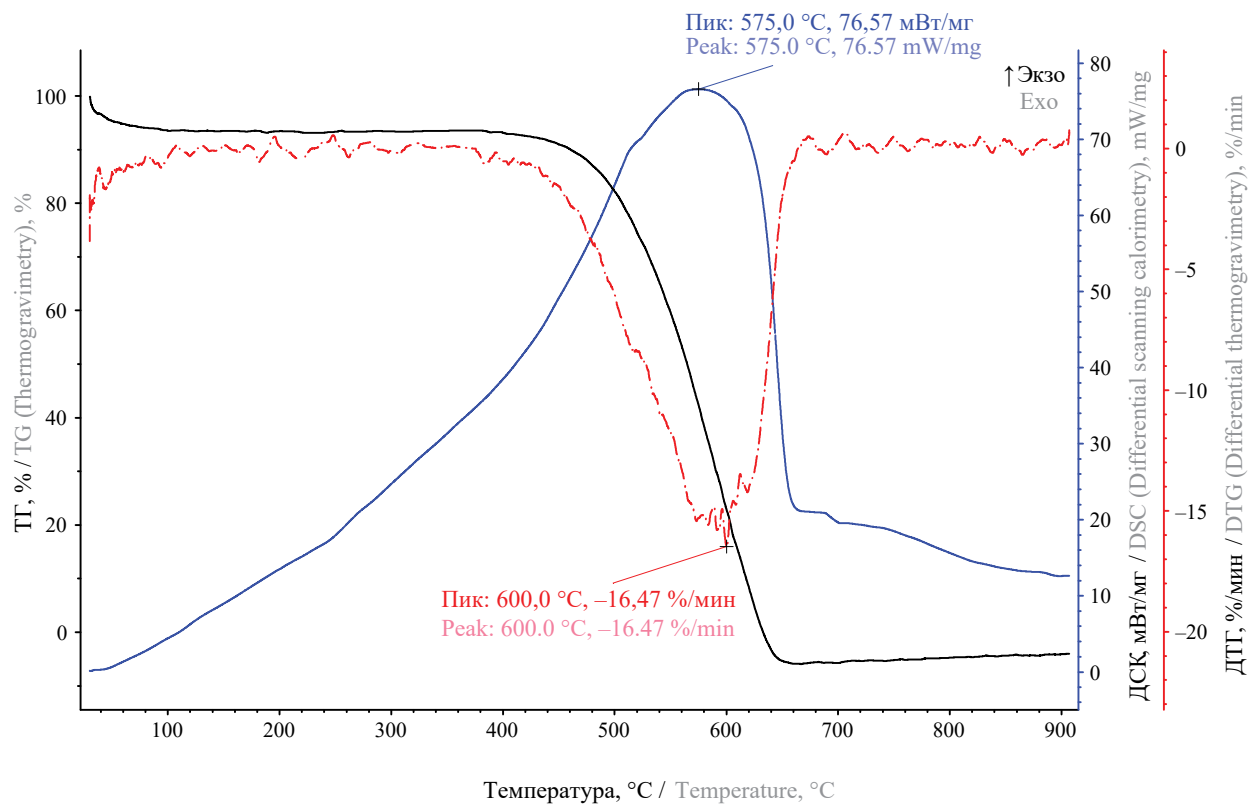
до  $T = 600$  °С на него, доказывает возможность идентификации данного полимера методом СТА.

Термограмма пленки из 100 % ПВХ представлена на рис. 7.

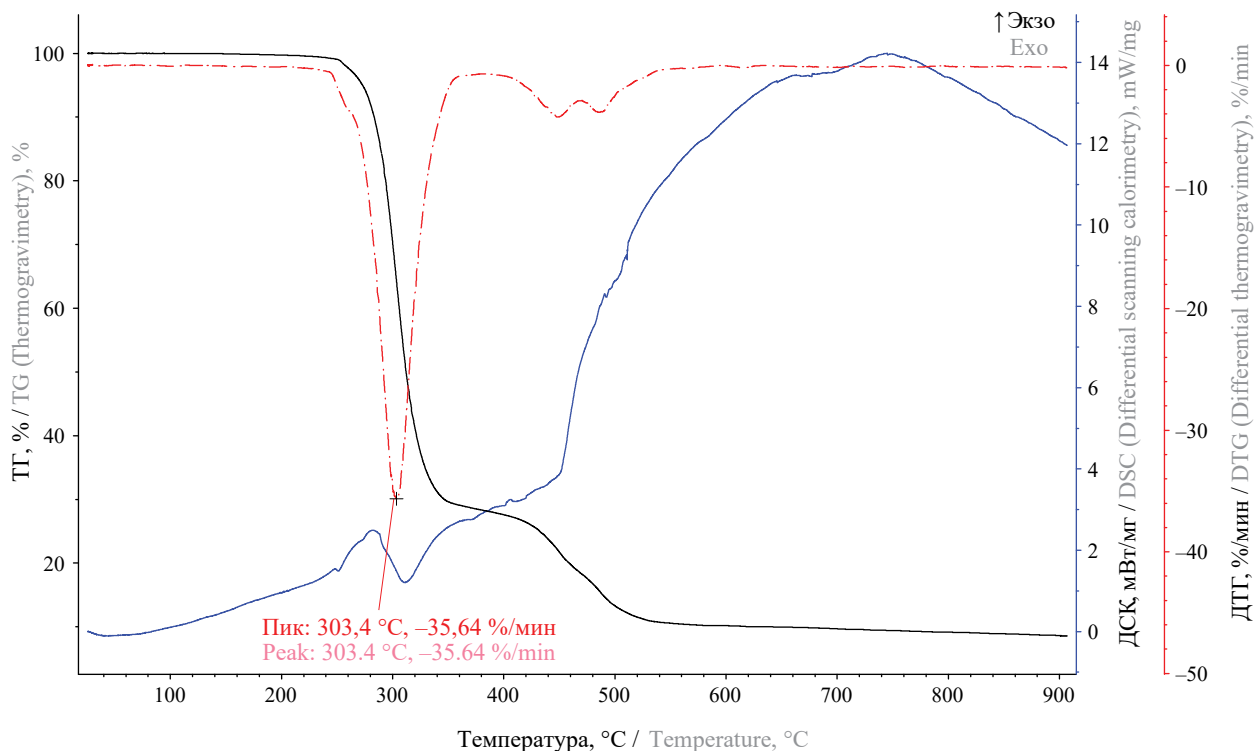
Отсутствие на ДСК кривой пика плавления и вместе с тем способность ПВХ переходить в вязкотекучее состояние при воздействии высоких температур свидетельствует о его аморфной природе. Аморфные полимеры диагностируют по температуре стеклования. Согласно справочной информации, температурный интервал стеклования ПВХ приходится на отрицательные значения температур, что указывает на невозможность проведения исследований процесса стеклования на применяемом



**Рис. 5.** Термограмма поликарбоната после масштабирования  
**Fig. 5.** Thermogram of polycarbonate after scaling



**Рис. 6.** Термограмма ПК в среде воздуха после предварительного температурного воздействия ( $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
**Fig. 6.** Thermogram of PC in air after preliminary temperature exposure ( $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



**Рис. 7.** Термограмма поливинилхлорида в среде азота  
**Fig. 7.** Thermogram of polyvinyl chloride in nitrogen environment

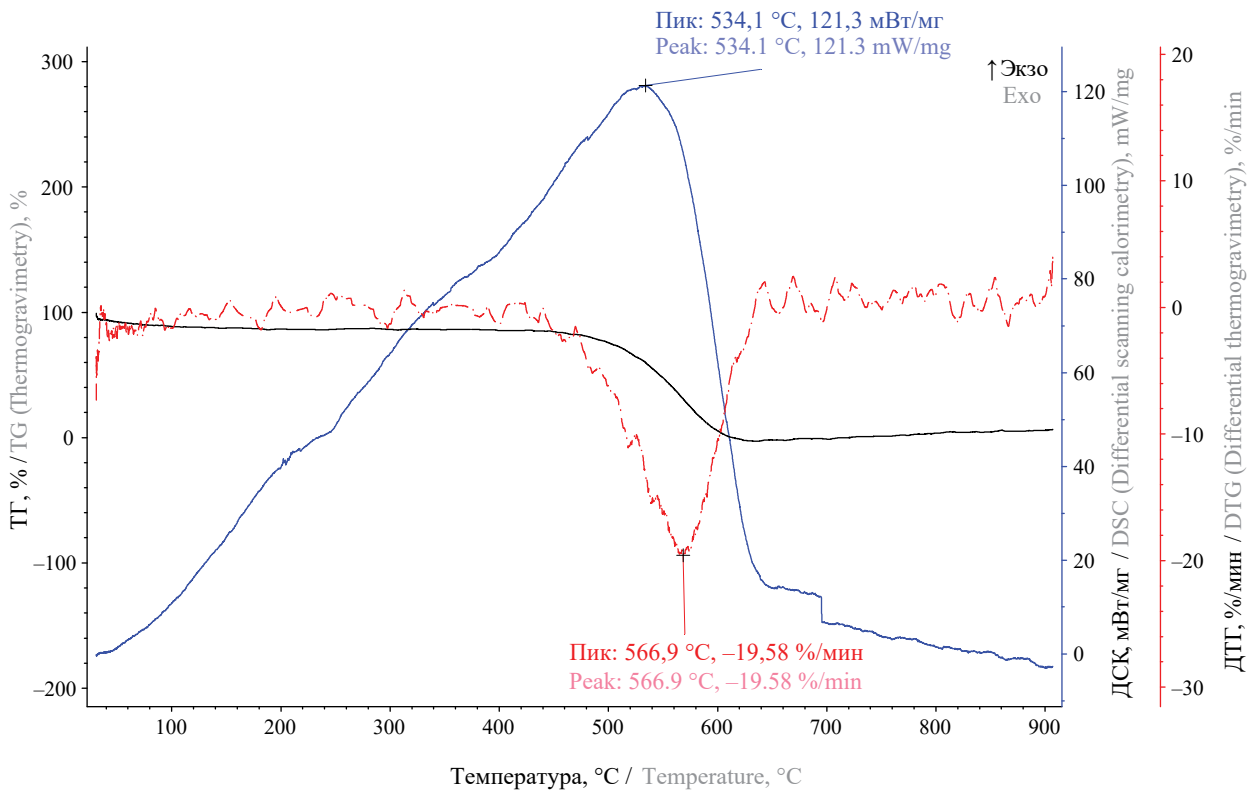


Рис. 8. Термограмма ПВХ в среде воздуха после предварительного температурного воздействия ( $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  
 Fig. 8. Thermogram of PVC in air after preliminary temperature exposure ( $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

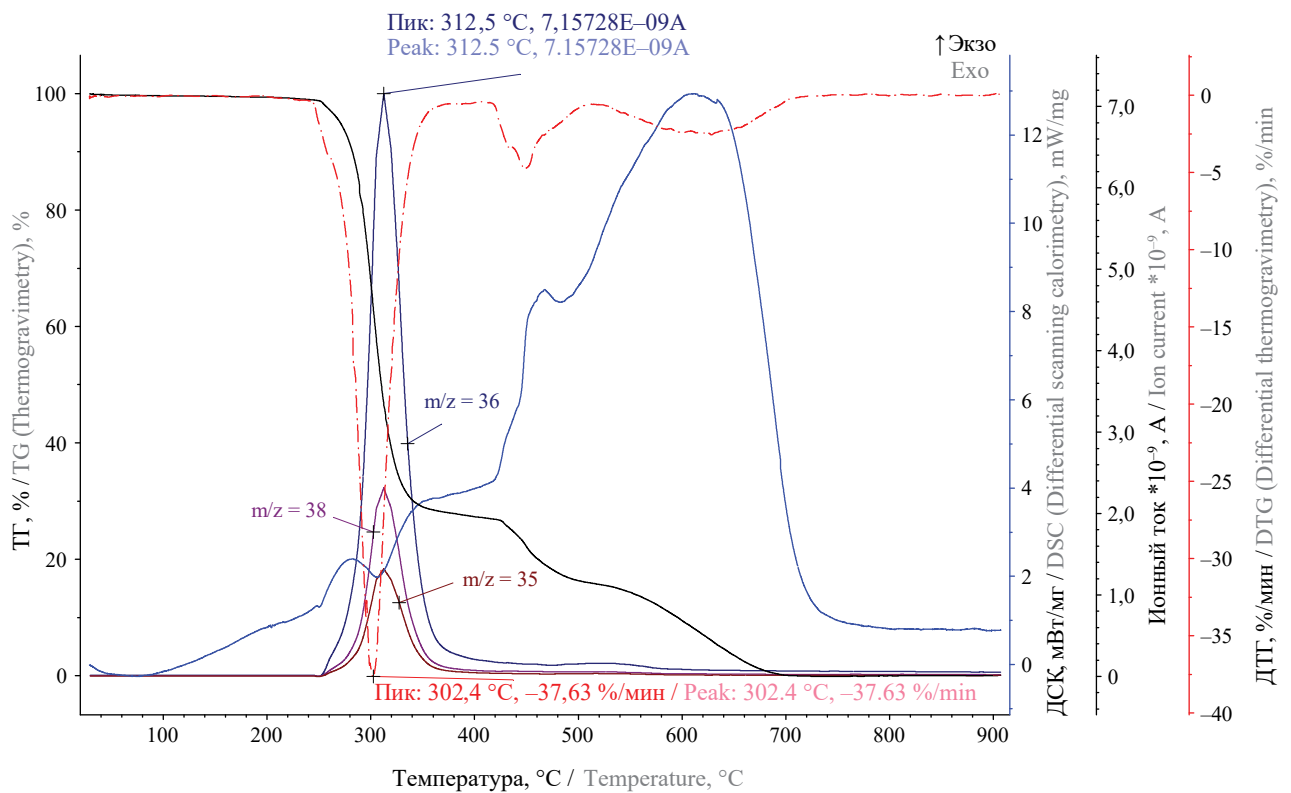


Рис. 9. Термограмма ПВХ с кривыми ионного тока с массовыми числами  $m/z = 35$  а.е.м.,  $m/z = 36$  а.е.м. и  $m/z = 38$  а.е.м.  
 Fig. 9. PVC thermogram with ion current curves with mass numbers  $m/z = 35$  a.m.u.,  $m/z = 36$  a.m.u. and  $m/z = 38$  a.m.u.



Термоаналитические характеристики термопластичных полимеров для определения их химической природы  
Thermoanalytical characteristics of thermoplastic polymers to determine their chemical nature

Полимер Polymer	Идентификационные термоаналитические характеристики Identification thermoanalytical characteristics		
	$T_{пл}$ или $T_{ст}$ в среде азоте / $T_{пл}$ или $T_{ст}$ в среде воздуха, °C/°C $T_{mel}$ or $T_g$ in inert environment / $T_{mel}$ or $T_g$ in the air, °C / °C	$T_{ТД} / T_{ТОД}$ , °C / °C $T_{TD} / T_{TOD}$ , °C / °C	$T_{ДТГmax} / T_{ДСКmax}$ после высокотемпературного воздействия, °C / °C $T_{DTGmax} / T_{DSCmax}$ after high temperature exposure, °C / °C
ПЭ высокой плотности PE high density	137,9/135,0	463,1/462,4	-/672,5
ПК PC	142,4/143,0	523,0/518,6	600,0/575,6
ПВХ PVC	–	303,4/301,7	568,3/534,1

*Примечание:*  $T_{пл}$  — температура плавления;  $T_{ст}$  — температура стеклования;  $T_{ТД}$  — температура термодеструкции;  $T_{ТОД}$  — температура термоокислительной деструкции.

*Note:*  $T_{mel}$  — melting temperature;  $T_g$  — glass transition temperature;  $T_{TD}$  — thermal degradation temperature;  $T_{TOD}$  — thermo-oxidative degradation temperature.

термоанализаторе. В этом случае определить химическую природу полимера представляется возможным по температуре разложения (температуре максимума на ДТГ кривой) при проведении исследований в инертной среде или по температуре термоокислительной деструкции в среде воздуха. Температурный максимум наибольшей интенсивности потери массы наблюдается при температуре 303,4 °C и значимо характеризует ПВХ.

Наличие ДТГ и ДСК пиков на термограмме ПВХ, полученной в окислительной среде воздуха (рис. 8) после предварительного теплового воздействия при  $T = 600$  °C на него, также доказывает возможность идентификации данного полимера.

Для получения дополнительных сведений при определении химической природы полимеров целесообразно применять метод масс-спектрометрии (квадрупольный масс-спектрометр Netzsch QMS 403 D Aëlos®) при совмещении его с методом СТА. В этом случае на термограмме дополнительно фиксируются кривые ионного тока при определенных значениях массовых чисел ( $m/z$ ) (рис. 9).

На термограмме приведены кривые ионного тока с массовыми числами, свидетельствующими о выделении хлороводорода и хлора, что в сочетании с полными данными масс-спектрального анализа исследуемого полимера позволяет квалифицировать его как ПВХ.

Результаты испытаний по определению идентификационных термоаналитических характеристик термопластичных полимеров приведены в таблице.

## Выводы

В результате исследований термопластичных полимерных материалов различной химической природы методом СТА определены значимые термоаналитические характеристики, позволяющие определить химическую природу полимера для дальнейшей диагностики возможности формирования ВОП:

- определение химической природы термопластичного полимера с высокой степенью кристалличности, не подверженного термическому воздействию в ходе пожара, целесообразно проводить по температуре плавления, определяемой по максимуму эндотермического пика в интервале температур 100–300 °C на ДСК кривой;
- определение химической природы нативных образцов аморфных термопластичных полимеров необходимо проводить по температуре стеклования, применяя в случае необходимости масштабирование ДСК сигнала;
- в качестве значимой термоаналитической характеристики для идентификации полимеров нативных образцов, а также образцов, в незначительной степени подверженных термическому воздействию (до температуры 300 °C), может выступать температура максимума ДТГ пика, характеризующая максимальную интенсивность термодеструкции (в инертной среде) или термоокислительной деструкции (в окислительной среде воздуха).

Показана возможность определения химической природы полимеров, подверженных высокотемпературному воздействию (до  $T = 600$  °C), по максимумам ДТГ и ДСК пиков на термоаналитических кривых. При производстве пожарно-технической экспертизы идентификация таких термопластов возможна только при наличии у эксперта базы данных (термограмм) полимерных материалов после предварительного теплового воздействия на них.

Анализ полученных результатов свидетельствует о возможности применения метода СТА для определения химической природы термопластичных полимеров с мест пожара при диагностике формирования вторичных очагов пожара. Для получения большей информации для идентификации исследуемых полимеров целесообразно использовать совмещение метода СТА с методом масс-спектрометрии.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Бесчастных А.Н., Чешко И.Д., Андреева Е.Д.* Экспертное исследование после пожара остатков пенополиуретанов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2004. № 1. С. 80–86.
2. *Zhiyi Jia, Xinyang Zhang, Xinyang Wang, Tao Zhao, Xinggang Chen, Minjie Wu et al.* Structural design and synthesis of naphthalene-containing phthalonitrile polymer with excellent processability and high temperature properties // *Journal of Polymer Science*. 2023. Vol. 61. Issue 19. Pp. 2292–2302.
3. *Abid M.K., Abbas I.M.M., Abid N.K., Jwad M.K.* Investigate the thermal analysis properties of polymer electrolyte // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2114. P. 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/2114/1/012048
4. *Billah K.M.M., Lorenzana F.A.R., Martinez N.L., Chacon S., Wicker R.B., Espalin D.* Thermal analysis of thermoplastic materials filled with chopped fiber for large area 3D printing // *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium : An Additive Manufacturing Conference Texas*. August. 2019. Pp. 892–898.
5. *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications / J.D. Menczel, R.B. Prime (ed.)*. John Wiley & Sons, Publ. 2008. 688 p.
6. *Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P.* Thermal analysis of plastics : Theory and practice; Carl Hanser Verlag: Munich, Germany. 2004. 400 p. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138988997>
7. *Беззапонная О.В.* Исследование окислительно-деструктивных процессов, протекающих в огнезащитных составах интумесцентного типа с течением времени, методом термического анализа // *Техносферная безопасность*. 2018. № 3 (20). С. 66–71.
8. *Hohenwarter D., Mattausch H., Fischer C., Berge M., Haar B.* Analysis of the Fire Behavior of Polymers (PP, PA 6 and PE-LD) and their improvement using various flame retardants // *Materials*. 2020. Vol. 13. P. 5756. DOI: 10.3390/ma13245756
9. *Беззапонная О.В., Лузина М.Д., Динисламов М.М.* Применение метода синхронного термического анализа для оценки горючести веществ и материалов // *Техносферная безопасность*. 2022. № 4 (37). С. 127–140.
10. *Мокряк А.Ю., Чешко И.Д., Елисеев Ю.Н., Принцева М.Ю.* О роли горящих полимеров в возникновении и развитии пожара // *Расследование пожаров : сб. ст. под общ. ред. И.Д. Чешко*. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. Вып. 6. С. 119–124.
11. *Чешко И.Д., Принцева М.Ю., Лобанова О.В.* Инструментальные методы в современной пожарно-технической экспертизе // *Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности*. 2020. № 4. С. 29–41.
12. *Коптелов А.А., Коптелов И.А., Rogozina A.A., Юшков Е.С.* Возможности методов термического анализа в применении к исследованию кинетики термического разложения полимеров // *Журнал прикладной химии*. 2016. Т. 89. Вып. 9. С. 1163–1169.
13. *Charde S.J., Sonawane S.S., Sonawane S.H., Shimpic N.G.* Degradation kinetics of polycarbonate composites // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2018. Vol. 32 (2). Pp. 151–165. DOI: 10.15255/CABEQ.2017.1173
14. *Fateh T., Richard F., Rogaume T., Joseph P.* Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016. Vol. 120. Pp. 423–433. DOI: 10.1016/j.jaap.2016.06.014
15. *Беззапонная О.В., Хабибова К.И.* Применение метода термического анализа при идентификации термопластов и реактопластов в рамках пожарно-технической экспертизы // *Техносферная безопасность*. 2022. № (34). С. 85–91.
16. *Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю.* Идентификационный контроль огнезащитных составов интумесцентного типа методами термического анализа // *Техносферная безопасность*. 2019. № 1 (22). С. 52–57.
17. *Беззапонная О.В.* Оценка температуры воздействия на древесину в условиях пожара методами термического анализа // *Техносферная безопасность*. 2020. № 3 (28). С. 70–80.
18. *Мокряк А.Ю., Елисеев Ю.Н., Чешко И.Д.* О пожароопасных свойствах накладных светодиодных светильников // *Расследование пожаров : сб. ст. / под общ. ред. И.Д. Чешко*. СПб. : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019. Вып. 6. С. 108–118.
19. *Принцева М.Ю., Чешко И.Д.* Применение термического анализа в экспертных исследованиях по делам о пожарах // *Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : сб. ст. по мат. Всеросс. науч.-практ. конф. Железногорск : ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия*, 2019. С. 260–270.
20. *Принцева М.Ю., Лобова С.Ф.* Применение термического анализа для расчета кинетических параметров термодеструкции полимеров при выполнении реконструкции пожара // *Современные пожаробезопасные материалы и технологии : сб. мат. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-й годовщине МЧС России*. Иваново, 2020. С. 95–99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44196459>

## REFERENCES

1. Beschastnykh A.N., Cheshko I.D., Andreeva E.D. Expert study of polyurethane foam residues after a fire. *Pozharovzryvbezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2004; 1:80-86. (rus).
2. Zhiyi Jia, Xinyang Zhang, Xinyang Wang, Tao Zhao, Xinggong Chen, Minjie Wu, et al. Structural design and synthesis of naphthalene-containing phthalonitrile polymer with excellent processability and high temperature properties. *Journal of Polymer Science*. 2023; 61(19):2292-2302.
3. Abid M.K., Abbas I. M.M., Abid N.K., Jwad M.K. Investigate the thermal analysis properties of polymer electrolyte. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2114:012048. DOI: 10.1088/1742-6596/2114/1/012048
4. Billah K.M.M., Lorenzana F.A.R., Martinez N.L., Chacon S., Wicker R.B., Espalin D. Thermal analysis of thermo-plastic materials filled with chopped fiber for large area 3D printing. *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium : an Additive Manufacturing Conference Texas. August*. 2019; 892-898.
5. *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications*. J.D. Menczel, R.B. Prime (ed.). John Wiley & Sons, Publ., 2008; 688.
6. Ehrenstein G.W., Riedel G., Trawiel P. *Thermal Analysis of Plastics: Theory and Practice*. Carl Hanser Verlag: Munich, Germany. 2004; 400. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138988997>
7. Bezzaponnaya O.V. Study of oxidative-destructive processes occurring in fire retardant compositions of the intumescent type over time using the method of thermal analysis. *Technosphere safety*. 2018; 3(20):66-71. (rus).
8. Hohenwarter D., Mattausch H., Fischer C., Berge M., Haar B. Analysis of the Fire Behavior of Polymers (PP, PA 6 and PE-LD) and their Improvement Using Various Flame Retardants. *Materials*. 2020; 13:5756. DOI: 10.3390/ma13245756
9. Bezzaponnaya O.V., Luzina M.D., Dinislamov M.M. Application of the method of synchronous thermal analysis to assess the flammability of substances and materials. *Technosphere Safety*. 2022; 4(37):127-140. (rus).
10. Mokryak A.Yu., Cheshko I.D., Eliseev Yu.N., Princeva M.Yu. *On the role of burning polymers in the occurrence and development of fire. Investigation of fires : collection of articles*. St. Petersburg, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 6:119-124. (rus).
11. Cheshko I.D., Princeva M.Yu., Lobanova O.V. Instrumental methods in modern fire-technical examination. *Supervision activities and forensic examination in the security system*. 2020; 4:29-41. (rus).
12. Koptelov A.A., Koptelov I.A., Rogozina A.A., Yushkov E.S. Possibilities of thermal analysis methods in application to the study of the kinetics of thermal decomposition of polymers. *Zhurnal prikladnoj himii/Journal of Applied Chemistry*. 2016; 89(9):1163-1169. (rus).
13. Charde S.J., Sonawane S.S., Sonawane S.H., Shimpic N.G. Degradation Kinetics of Polycarbonate Composites. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2018; 32(2):151-165. DOI: 10.15255/CABEQ.2017.1173
14. Fateh T., Richard F., Rogaume T., Joseph P. Experimental and modeling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016; 120:423-433. DOI: 10.1016/j.jaap.2016.06.014
15. Bezzaponnaya O.V., Khabibova K.I. Application of the thermal analysis method in the identification of thermoplastics and thermosets within the framework of fire-technical examination. *Technosphere Safety*. 2022; 34:85-91. (rus).
16. Bezzaponnaya O.V., Golovina E.V., Akulov A.Yu. Identification control of fire retardant compositions of intumescent type using thermal analysis methods. *Technosphere Safety*. 2019; 1(22):52-57. (rus).
17. Bezzaponnaya O.V. Assessment of the impact temperature on wood under fire conditions using thermal analysis methods. *Technosphere Safety*. 2020; 3(28):70-80. (rus).
18. Mokryak A.Yu., Eliseev Yu.N., Cheshko I.D. On the fire hazardous properties of overhead LED lamps. *Fire Investigation : collection of Articles*. St. Petersburg, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 6:108-118. (rus).
19. Princeva M.Yu., Cheshko I.D. Application of thermal analysis in expert research on fire cases. *Current Problems of Ensuring Fire Safety and Protection from Emergency Situations : collection of articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Zheleznogorsk, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian Fire and Rescue Academy, 2019; 260-270. (rus).
20. Princeva M.Yu., Lobova S.F. Application of thermal analysis to calculate the kinetic parameters of thermal destruction of polymers when performing fire reconstruction. *Modern fire-safe materials and technologies : collection of materials of the IV International scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. Ivanovo, 2020; 95-99. (rus).

Поступила 27.10.2023, после доработки 07.11.2023;  
принята к публикации 15.11.2023

Received October 27, 2023; Received in revised form November 7, 2023;  
Accepted November 15, 2023

**Информация об авторах**

**БЕЗЗАПОННАЯ Оксана Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, улица Мира, 22; РИНЦ ID: 119257; Scopus AuthorID 6504618195; ResearcherID R-8727-2019; ORCID 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

**МАКАРКИН Сергей Викторович**, кандидат юридических наук, доцент, начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, улица Мира, 22; РИНЦ ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: mak\_s@e1.ru

**ГЛУХИХ Павел Александрович**, старший преподаватель кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, улица Мира, 22; РИНЦ ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Беззапонная О.В.** — *идея; проведение исследований и обработка результатов; написание и научное редактирование статьи.*

**Макаркин С.В.** — *сбор материала; обработка материала.*

**Глухих П.А.** — *сбор материала; обработка материала.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

**Oksana V. BEZZAPONNAYA**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise of the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 22; ID RSCI: 119257; Scopus AuthorID 6504618195; ResearcherID R-8727-2019; ORCID 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

**Sergey V. MAKARKIN**, Candidate of Legal Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 22; ID RSCI: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: mak\_s@e1.ru

**Pavel A. GLUKHIKH**, senior lecturer of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise, the Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Russia, 620062, Ekaterinburg, Mira St., 22; ID RSCI: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Oksana V. Bezzaponnaya** — *idea; research and processing of results; writing and scientific editing of the article.*

**Sergey V. Makarkin** — *collection of material; processing of material.*

**Pavel A. Glukhikh** — *collection of material; processing of material.*

*The authors declare no conflicts of interests.*