

УДК 614.841

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ВТОРИЧНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Беззапонная Оксана Владимировна, Глухих Павел Александрович, Елфимова Марина Владимировна, Макаркин Сергей Викторович
Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлена методология дифференциации первичных и вторичных очагов пожара при производстве судебных пожарно-технических экспертиз, рассмотрены основные этапы методики диагностики вторичных очагов пожара. Разработанная методика распространяется на пожары с признаками формирования нескольких очаговых зон, горючей нагрузкой на которых выступают полимерные материалы различной химической природы, в том числе термопласты, способные плавиться, растекаться, капать и гореть, формируя вторичные очаги пожара.

В основу дифференциации первичных и вторичных очагов пожара положена продолжительность высокотемпературного воздействия на материал отделки помещения, в котором произошел пожар. Дополнительным критерием является температура воздействия на материал в ходе пожара. Температура и продолжительность высокотемпературного воздействия на материал рассчитываются по эмпирическим уравнениям множественной линейной регрессии, получаемым по результатам предварительных испытаний образцов материалов методом синхронного термического анализа.

Окончательный вывод о месте нахождения вторичного очага пожара принимается после проведения оценки возможности возгорания материала горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов (для изолированных очаговых зон) или после сопоставления распределения пожарной нагрузки по помещению с расположением очаговых зон (при наличии огневой связи).

Ключевые слова: пожарно-техническая экспертиза, пожарная нагрузка, термоокислительная деструкция полимерных материалов, продолжительность высокотемпературного воздействия, регрессионный анализ

Для цитирования: Методика диагностики вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 5–20.

METHOD OF DIAGNOSTICS OF SECONDARY FIRE SPOTS IN THE STUDY OF POLYMERIC MATERIALS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS

Oksana V. Bezzaponnaya, Pavel A. Glukhikh, Marina V. Elfimova, Sergey V. Makarkin
UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This article presents a methodology for differentiating primary and secondary fire sources during forensic fire examinations. It also examines the key stages of the secondary fire diagnostic method for examining polymeric materials using synchronous thermal analysis. The developed methodology applies to fires with signs of multiple fire zones, where the combustible load consists of polymeric materials of varying chemical nature, including thermoplastics, which can melt, spread, drip, and burn, forming secondary fire sources.

The differentiation of primary and secondary fire sources is based on the duration of high-temperature exposure of the finishing material of the room where the fire occurred. An additional criterion is the temperature of exposure to the material during the fire. The temperature and duration of high-temperature exposure to the material are calculated using empirical equations of multiple linear regression, obtained from preliminary testing of material samples using synchronous thermal analysis. The final conclusion about the location of the explosive hazard is made after assessing the possibility of ignition of the combustible load material from dripping burning masses of thermoplastics (for isolated focal zones) or after comparing the distribution of the fire load in the room with the location of the focal zones (in the presence of a fire connection).

Keywords: fire-technical expertise, fire load, thermal-oxidative destruction of polymeric materials, duration of high-temperature exposure, regression analysis

For citation: Method of diagnostics of secondary fire spots in the study of polymetric materials by the method of synchronous thermal analysis / O. V. Bezzaponnaya [et al.] // Technosphere safety. 2026. No. 3 (52). P. 5–20.

Введение

Актуальность работы обусловлена проблемой диагностики вторичных очагов пожара при производстве пожарно-технических экспертиз по причине перехода в текучее и вязкотекучее состояние термопластичных полимерных материалов, составляющих пожарную нагрузку современных зданий и помещений. В настоящее время отсутствует методика (четкий алгоритм действий) для диагностики вторичных очагов пожара (ВОП), в частности:

- для диагностики термопластов нет базы данных термограмм и термоаналитических характеристик полимерных материалов, полученных в условиях, приближенных к условиям пожара;

- не определены критерии и способы дифференциации термопластов и реактопластов;

- не сформирована методика оценки температуры и продолжительности воздействия на отделочные строительные материалы;

- не разработан алгоритм оценки возможности возгорания материалов горючей нагрузки от контакта с капаящими или растекающимися горящими массами термопластов;

- отсутствуют (или очень разрозненны) данные по кинетике термоокислительной деструкции полимерных материалов, позволяющие оценить их возгорание в условиях развившегося пожара с формированием ВОП.

Данные факты диктуют необходимость проведения исследований с использованием высокоточного и информативного метода синхронного термического анализа (СТА) и разработки методики диагностики ВОП.

Диагностика ВОП является комплексной и достаточно трудоемкой задачей, включающей в себя несколько этапов, основные из которых:

- диагностика термопластичных полимерных материалов методом СТА в очаговой зоне или над ней;
- оценка температуры и продолжительности воздействия на строительный полимерный материал в ходе пожара методом СТА;
- оценка возможности возгорания материала горючей нагрузки от контакта с горящими массами термопласта с использованием данных, полученных методом СТА;
- сопоставление распределения пожарной нагрузки с расположением очаговых зон;
- синтез информации.

Для отработки версии о формировании ВОП важной задачей является диагностика термопластов, обнаруженных в очаговой зоне или над ней в ходе осмотра места пожара. В первую очередь проводится проверка наличия фазовых переходов у образцов полимерных материалов в ходе их термолиза с использованием метода СТА [1] для диагностики полукристаллических термопластов. Для диагностики аморфных термопластов авторами работы были определены критерии дифференциации аморфных термопластов и реактопластов, а также способ и алгоритм диагностики значимых термоаналитических характеристик. Их разработка включала: анализ результатов экспериментальных исследований полимеров; изучение тесноты связи между рассматриваемым процессом и исследуемой характеристикой; оценку статистиче-

ской значимости полученного коэффициента корреляции с использованием статистического критерия Стьюдента.

Для диагностики ВОП самым важным этапом являлась оценка температуры, а главное — продолжительности высокотемпературного воздействия на строительный отделочный материал в ходе пожара, желательно расположенного в нижней части помещения, где влияние конвективных потоков на материал выражено в меньшей степени. Сложность диагностики ВОП заключалась в том, что нужно было оценить сразу два параметра: температуру и продолжительность высокотемпературного воздействия на материал в ходе пожара.

Для решения этой комплексной задачи целесообразно применять современные инструментальные методы, в частности, высокоточный (погрешность при определении температуры и массы не превышает 1,5 %) и информативный метод СТА, позволяющий в ходе одного испытания регистрировать сразу несколько характеристик, в зависимости от температуры и/или времени.

Метод термического анализа уже применялся для оценки температуры воздействия на такие строительные материалы, как гипс [2], бетон [3–5], гипсо-цементный пенобетон [6], цементный камень [7], штукатурка [8], древесина [9, 10], лакокрасочные покрытия [11] и огнезащитные составы [12]. Критериями для оценки температуры воздействия на них являлись: потеря массы при температуре, значимо характеризующей процесс термоокислительной деструкции исследуемого материала, зольный остаток, температура при заданной потере массы и другие термоаналитические характеристики. Однако работ, в которых бы решалась задача оценки температуры и времени воздействия

на материал с использованием современных и высокоточных инструментальных методов, в том числе методов термического анализа, в настоящее время нет, что свидетельствует об актуальности темы исследования.

Оценка температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на исследуемый материал

Оценка температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на исследуемый материал возможна при получении зависимости значимых термоаналитических характеристик (ТАХ) от двух факторов — температуры и времени предварительного отжига образцов исследуемого материала с применением метода множественной регрессии.

Для исследований выбран полимерный материал — ламинат 33-го класса износостойкости, часто применяемый для отделки полов жилых и офисных помещений. При подготовке образцов для исследований ламинат предварительно измельчался для получения однородной массы. Масса образцов ламината для испытаний составляла 4–5 мг. Перед испытанием образцы выдерживали в течение 24 ч при комнатной температуре и относительной влажности воздуха $(50 \pm 10) \%$.

Исследования образцов ламината проводились методом СТА с использованием термоанализатора STA 449 F5 Jupiter в окислительной среде воздуха в корундовых тиглях со скоростью нагрева $20^\circ\text{C}/\text{мин}$. Начальная температура — $25\text{--}308^\circ\text{C}$, конечная — 910°C .

Для исследования зависимости ТАХ от времени и температуры воздействия образцы ламината предварительно подвергались термическому воздействию в термоанализаторе. Исходная масса образцов

ламината составляла 7–9 г, в зависимости от степени термического воздействия на них. Значения температур воздействия определялись температурным интервалом пика на кривой дифференциальной термогравиметрии (ДТГ), характеризующего процесс термоокислительной деструкции (ТОД) исследуемого материала, с шагом 50°C . Время высокотемпературного воздействия составляло 15, 30, 45 и 60 мин.

После предварительного отжига образцов ламината проводилось их кондиционирование, а затем снимались термограммы. При этом время кондиционирования для всех исследуемых образцов полимерного материала было постоянным (одинаковым). Полученные термограммы обрабатывались с использованием программного обеспечения Proteus 6.1.

Термограмма нативного образца ламината 33-го класса износостойкости приведена на рис. 1.

Анализ термограммы свидетельствует о том, что процесс ТОД ламината наиболее интенсивно протекает в интервале температур $300\text{--}400^\circ\text{C}$, что определило значения температур предварительного воздействия на исследуемый полимерный материал: 300°C , 350°C , 400°C .

Корреляционный анализ полученных результатов исследований позволил определить значимые ТАХ, для которых наблюдалась высокая теснота связи с температурой и продолжительностью высокотемпературного воздействия на ламинат: зольный остаток и температура ТОД данного полимерного материала (температура максимума ДТГ-пика).

В результате регрессионного анализа, где зависимыми переменными выступали зольный остаток и температура ТОД,

а независимыми — температура и продолжительность высокотемпературного воздей-

ствия, получена система уравнений множественной линейной регрессии (1) и (2):

$$T_{\text{ДТГ}} = -131,064 + 1,588 \cdot T + 0,718 \cdot \tau, \quad (1)$$

$$ЗО = 27,832 + 0,066 \cdot T + 0,180 \cdot \tau, \quad (2)$$

где:

ЗО — зольный остаток при температуре 900 °С, %;

$T_{\text{ДТГ}}$ — температура ТОД исследуемого материала (температура максимума пика на кривой дифференциальной термогравиметрии), °С;

T — температура предварительного воздействия, °С;

τ — время предварительного высокотемпературного воздействия, мин.

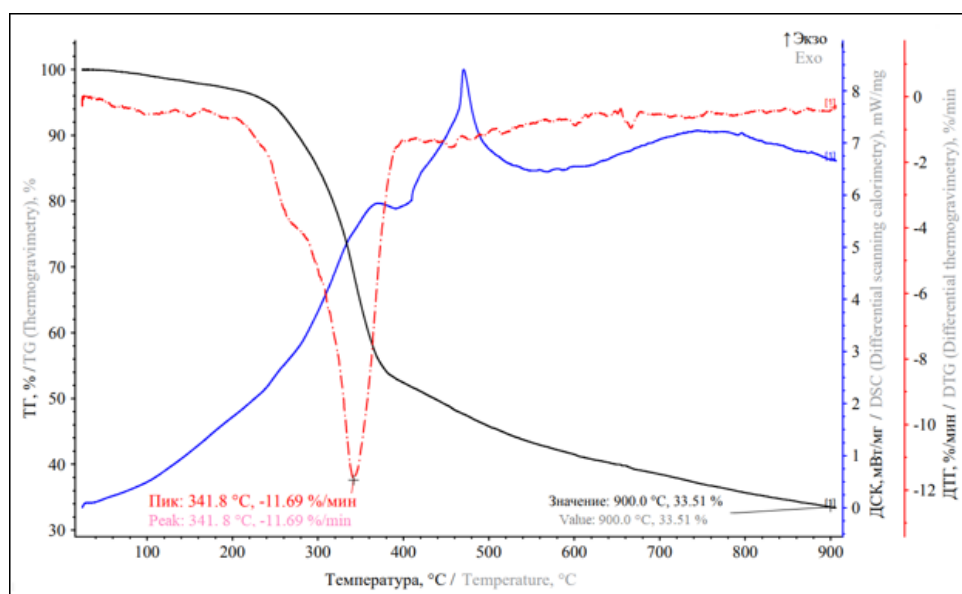


Рис. 1. Термограмма нативного образца ламината 33-го класса износостойкости в среде воздуха

Fig. 1. Thermogram of a native laminate sample of wear resistance class 33 in an air environment

Проведенная проверка адекватности моделей регрессии показала, что значения коэффициента детерминации (R^2), характеризующего адекватность моделей для уравнений (1) и (2), составили соответственно $R^2 = 0,945$ и $R^2 = 0,974$. Значения коэффициента множественной корреляции (R), характеризующего тесноту линейной корреляционной связи между независимыми переменными (температура и время) и зависимыми переменными (температура ТОД, зольный остаток), со-

ставляли соответственно $R = 0,972$ и $R = 0,987$. Статистическая значимость связи в рассматриваемых моделях регрессии (P -значение) — менее 0,05.

По результатам апробации полученных эмпирических уравнений относительная погрешность определения температуры воздействия на ламинат составила менее 1 %, а времени предварительного воздействия на исследуемый материал — менее 5 %, что свидетельствует о достоверности результатов, полученных с использованием

разработанного способа оценки температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на образцы исследуемого полимерного материала.

Данный способ оценки был успешно апробирован на образцах линолеума, который также часто применяется в качестве отделочного материала зданий и офисных помещений. Зольный остаток и температура ТОД также показали высокие значения коэффициентов множественной корреляции и детерминации в ходе проверки адекватности моделей (эмпириче-

ских уравнений множественной линейной регрессии).

Результаты апробации предложенного способа оценки температуры и времени воздействия на материалы различной химической природы свидетельствуют о возможности применения данного методического подхода для оценки температуры и продолжительности высокотемпературного воздействия на полимерные материалы, применяемые при отделке зданий и помещений. Получаемые эмпирические уравнения имеют вид:

$$ЗО = a_0 + a_1 T + a_2 \tau, \quad (3)$$

$$T_{\text{ДТГ}} = b_0 + b_1 T + b_2 \tau, \quad (4)$$

где:

ЗО — зольный остаток при температуре 900 °С, %;

$T_{\text{ДТГ}}$ — температура ТОД исследуемого материала (температура максимума пика на кривой дифференциальной термогравиметрии), °С;

T — температура предварительного воздействия, °С;

τ — время предварительного высокотемпературного воздействия, мин;

a_1, a_2, b_1, b_2 — коэффициенты регрессии;

a_0 и b_0 — свободные члены уравнений регрессии.

Важным этапом диагностики ВОП также является оценка возможности возгорания материалов горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов.

Оценка возможности возгорания материалов горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов

Для оценки возможности возгорания материалов горючей нагрузки в результа-

те контакта с расплавленными горящими массами термопластов предложен подход, основанный на решении уравнения теплопроводности.

В соответствии с тепловой теорией зажигания Я. Б. Зельдовича [13] для математического решения задачи о возможности зажигания поверхности материала горючей нагрузки (ГН) критерием зажигания является выполнение условия (5):

$$\left. \frac{d\theta}{d\tau} \right|_{\tau = \tau_{\text{и}}} = 0, \quad (5)$$

где:

θ — безразмерная температура раскаленного тела (горящего расплавленного термопласта);

τ — время, с;

$\tau_{\text{и}}$ — время задержки возгорания материала ГН (период индукции зажигания), с.

Оценка возможности возгорания материалов ГН от контакта с горящими массами термопластов сводится к расчету:

- критических значений радиуса капель термопласта или $\frac{1}{2}$ толщины слоя термопласта на поверхности горючего материала;
- индукционного периода зажигания горючего материала, при которых выпол-

няется условие зажигания (тепловыделение в системе «горящий расплав термопласта — материал» превышает теплоотвод в окружающую среду) [14].

Расчет критического радиуса капель термопласта r_{0*} и $\frac{1}{2}$ толщины слоя термопласта (d_0) на поверхности горючего материала производится по формуле (6):

$$r_{0*} = x_{0*} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_r \cdot R \cdot T_*^2}{q \cdot A \cdot E_a \cdot m^n} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_*}\right)}, \quad (6)$$

где:

λ_r — теплопроводность горючего материала, Вт/м · К;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/моль · К;

T_* — характерная температура, равная максимально возможной начальной температуре горящего термопластичного полимерного материала, К;

q — тепловой эффект реакции термоокислительной деструкции материала ГН, определяемый методом СТА по площади пика на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК-кривой), характеризующего ТОД (горение) исследуемого материала, Дж/кг;

A — предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса, определяемый по результатам термического анализа, с⁻¹;

E_a — энергия активации, определяемая по результатам термического анализа, Дж/моль;

m — массовая концентрация реакции ТОД материала ГН, %;

n — порядок реакции термоокислительной деструкции горючего материала;

m_n принимается равной единице, так как в качестве материала ГН рассматриваются твердые материалы;

x_{0*} — безразмерный критический радиус капли горящего термопласта ($\frac{1}{2}$ толщины слоя термопласта на поверхности материала), рассчитывается по формуле (7):

$$x_{0*} = \frac{a \cdot (k+1) \cdot \theta_n^2 \cdot \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} e \left[1 + \frac{1}{\theta_n} \cdot \left(\frac{5 \cdot k}{3 \cdot a \cdot (k+1)} - 4 \right) \right], \quad (7)$$

где:

$a = \frac{C_p \cdot \rho}{C_{p0} \cdot \rho_0}$ — безразмерная объемная теплоемкость;

C_p — удельная теплоемкость материала ГН, Дж/кг · К;

ρ — плотность материала ГН, кг/м³;

C_{p0} — удельная теплоемкость термопласта, Дж/кг · К;

ρ_0 — плотность термопласта, кг/м³;

k — показатель симметрии нагретого тела: для сферической капли горящего капающего термопласта $k = 2$, для слоя расплава термопласта $k = 0$;

θ_n — начальная безразмерная температура материала ГН, рассчитывается по формуле (8):

$$\theta_n = \frac{(T_* - T_n) \cdot E_a}{R \cdot T_*^2}, \quad (8)$$

где T_n — минимально возможная начальная температура материала ГН, К.

Если размер капель горящего термопласта r_T будет меньше критического r_{0*} , то зажигание не возникнет. Если размер капель термопласта больше критического, то усло-

вие зажигания (5) будет выполняться и произойдет зажигание рассматриваемого горючего материала от горящих капель термопласта.

Время индукции зажигания при критических условиях рассчитывается по следующей формуле (9):

$$\tau_n = \frac{C_p \rho R T^2}{6 q A E_a} \cdot \left(b + \sqrt{b^2 + \frac{3 \cdot \theta_n^3}{2 \cdot \theta_n - 3}} \right)^2 \exp \left(\frac{E_a}{R \cdot T} \right), \quad (9)$$

где b — безразмерное время индукции, которое при критических условиях рассчитывается по формуле (10):

$$b = \frac{3 \cdot a \cdot (k + 1) \cdot \theta_n^4}{4 \cdot x_{0*} \cdot (2 \cdot \theta_n - 3)} + \frac{k}{6 \cdot x_{0*}}. \quad (10)$$

Для определения температуры горящих капель термопластов, размера капель, а также зажигательной способности горящих капель термопласта были проведены лабораторные испытания, моделирующие процесс формирования ВОП от контакта горючего материала с расплавленными массами термопластов с использованием тепловизионного метода.

Для испытаний использовался тепловизор Guide C640, с матрицей 640×512 пикселей, работающий в спектральном диапазоне 3,6–4,9 мкм. Тепловизор обеспечивал температурное разрешение 0,03 °С при точности измерений ±1,0 °С для интервала температур 100–800 °С.

В качестве материалов горючей нагрузки рассматривались: ламинат 33-го класса износостойкости и ПВХ-линолеум, приме-

няемые в качестве напольных покрытий в жилых и офисных помещениях, а также поролон (эластичный ППУ), применяемый для набивки мягкой мебели.

Исследовались термопластичные полимерные материалы различной химической природы: вспененный полиэтилен (ППЭ), полиэтилен низкой плотности ПЭНП, полипропилен (ПП), сотовый поликарбонат (ПК), полиэтилентерефталат (ПЭТ) в разных модификациях, ПВХ в виде натяжного потолка, ППС в виде потолочного плинтуса, экструдированный ППС, ПВХ-пластикат в виде кабель-канала.

Для испытаний образец термопластичного полимерного материала закреплялся в лапке штатива (рис. 2), поджигался. Фиксировался процесс его каплепадения, зажигательной способности, а также оценивалась температура

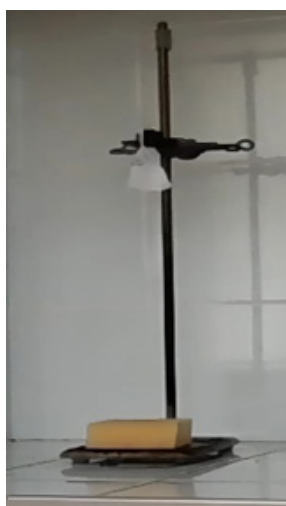
капель термопласта и размер. Для получения более точных значений температуры расплавленных термопластов вводилось значение коэффициента излучения ($K_{\text{изл}} = 0,9$).

Результаты оценки размера капающих масс термопластов и температуры расплава термопластов приведены в таблице.

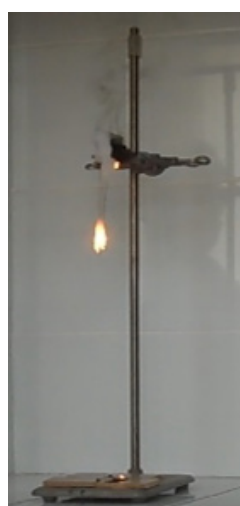
Анализ размера капель-агломератов термопластов свидетельствует о том, что их размер не превышал 35 мм. Максимальная температура горящих масс термопластов не превышала 918,4 К.

Полученные результаты применялись при проведении расчетного эксперимента по оценке возможности возгорания материалов горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов.

Кинетические параметры ТОД материала горючей нагрузки определяются по результатам термического анализа методом Бройдо [15]. Примеры оценки энергии активации и предэкспоненциального множителя ТОД полимерных материалов приведены в работах [16, 17].



а/а



б/б

Рис. 2. Установка для исследования зажигательной способности термопластов:

а — материал горючей нагрузки — эластичный ППУ; б — материал горючей нагрузки — ламинат

Fig. 2. Setup for testing the flammability of thermoplastics: а — flammable load material — elastic polyurethane foam; б — flammable load material — laminate

Таблица
Результаты оценки размера капающих масс термопластов
и температуры расплава термопластов

Table
Results of the evaluation of the size of dripping masses of thermoplastics
and the melt temperature of thermoplastics

Термопласт Thermoplastic	Размер капель-агломератов, d , мм Size of agglomerate drops, d , mm	Температура расплава горящего термопласта, T , К Melt temperature of burning thermoplastic, T , K
ПЭ вспененный Foamed PE	8–10	691,6–733,4
ПП PP	10–35	855,8–918,4

Окончание таблицы

Термопласт Thermoplastic	Размер капле-агломератов, d , мм Size of agglomerate drops, d , mm	Температура расплава горящего термопласта, T , К Melt temperature of burning thermoplastic, T , K
ППС экструдированный extruded polystyrene foam XPS	8–10	754,5–799,4
ПВХ (натяжной потолок) PVC (stretch ceiling)	10–15	710,4–716,8
ПВХ-пластикат PVC plastic	Отсутствие каплепадения No dripping	717,5–723,2
ПК сотовый PC mobile	Отсутствие каплепадения No dripping	693,0–698,2
ПЭТ (капрон) PET (nylon)	6–12	761,0–799,5
ПЭТ (портьерная ткань) PET (curtain fabric)	6–12	805,7–844,5

Диагностика вторичных очагов пожара при комплексном анализе и синтезе информации

При установлении очага пожара, в случае обнаружения нескольких очаговых зон, необходим анализ всей информации, полученной при осмотре места происшествия и при проведении исследований, а именно:

- информации, касающейся мест расположения очаговых зон;
- результатов диагностики методом СТА термопластов в очаговой зоне и особенно над ней;
- результатов оценки значений температуры и продолжительности их воздействия на строительный отделочный материал, полученных методом СТА;
- информации о распределении пожарной нагрузки в помещении до момента возникновения пожара;
- информации о последовательности тушения пожара (в какие зоны горения осуществлялась подача огнетушащих веществ на начальном этапе тушения и в ходе распространения горения).

Для обоснования выводов, касающихся месторасположения ВОП, полученные результаты необходимо подкрепить:

- в случае формирования местных очагов пожара — результатами сопоставления распределения пожарной нагрузки с распределением выявленных очаговых зон;
- в случае формирования изолированных очагов пожара (горения) по причине капания горящих масс термопластов — результатами оценки возможности возгорания материалов горючей нагрузки после контакта с расплавленными массами термопластов, с использованием расчетного эксперимента и результатов исследований, полученных методом СТА.

Для диагностики изолированных очагов горения выявленную картину распределения очаговых зон и результатов оценки температуры и продолжительности воздействия на строительный полимерный материал (ламинат, линолеум, ДВП, ДСП, фанера), полученных методом СТА, необходимо подкрепить результатами расчетов оценки

возможности возгорания материалов ГН от контакта с капяющими горящими массами термопластов, находившихся над рассматриваемой очаговой зоной.

Изолированный ВОП диагностируется при выполнении следующих условий:

- месторасположение обнаруженной очаговой зоны совпадает с зоной, в которой диагностирована максимальная температура воздействия на строительный полимерный материал, а длительность воздействия меньше времени высокотемпературного воздействия в другой очаговой зоне;

- над очаговой зоной обнаружены термопласты, способные плавиться и капать;

- в рассматриваемой очаговой зоне найден материал горючей нагрузки, потенциально способный воспламениться от контакта с горящим и капяющим термопластом;

- выполняются условия возгорания материала горючей нагрузки от капящих масс термопласта, находящегося над очаговой зоной;

- не подтвержден факт первоочередности тушения пожара в данной очаговой зоне.

Для диагностики местных очагов горения выявленную картину распределения

очаговых зон и результатов оценки значений температуры и продолжительности их воздействия на строительный полимерный материал (ламинат, линолеум, ДВП, ДСП, фанера), полученных методом СТА, необходимо подкрепить сопоставлением с картиной распределения пожарной нагрузки по объекту пожара. Важное значение при оценке типа и количества материалов ГН, а также ее расположения имеют показания очевидцев, которые необходимо учитывать при отработке версии о формировании ВОП.

При сопоставлении распределения пожарной нагрузки с распределением выявленных очаговых зон с признаками огневой связи необходимо:

- обозначить на плане помещения очаговые зоны по результатам осмотра места пожара;

- по результатам СТА обозначить на плане помещения температуру и продолжительность высокотемпературного воздействия на полимерный строительный материал в каждой из очаговых зон;

- используя показания сведущих лиц, обозначить на плане вид и количество горючей нагрузки в каждой из очаговых зон;

- оценить пожарную нагрузку (ПН, кДж) в каждой из очаговых зон (11):

$$ПН = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot m_i, \quad (11)$$

где:

Q_i — тепловой эффект горения i -го материала горючей нагрузки, кДж/кг;

m_i — масса i -го материала горючей нагрузки в рассматриваемой очаговой зоне, кг.

Тепловой эффект горения материала горючей нагрузки определяется методом СТА по площади пика на ДСК-кривой, характеризующего процесс ТОД исследуемого материала.

Местный ВОП диагностируется при выполнении следующего условия:

- места расположения очаговой зоны совпали с местами расположения зоны максимальной температуры воздействия

на строительный полимерный материал, но меньшей продолжительности высокотемпературного воздействия по сравнению с другой очаговой зоной;

- установлен факт сосредоточения горючих материалов с выделением большого количества тепла (высокой пожарной нагрузки) в данной очаговой зоне;

- не подтвержден факт первоочередности тушения пожара в данной очаговой зоне.

В случаях, когда очаговые признаки не сформировались или нивелировались в ходе пожара, проводится детальное исследование образцов отделочного строительного материала методом СТА, отобранных по всей площади помещения с шагом 0,5–1,0 м.

На заключительном этапе диагностики ВОП проводится реконструкция событий для восстановления картины возникновения и развития горения, исходя из предполагаемого очага (очагов) пожара, источника зажигания, свойств конструктивных и отделочных материалов здания. После полного совпадения реконструированной картины с точно известными обстоятельствами пожара делается окончательный вывод об очаге пожара и очагах горения.

Разработанная методика «Диагностика вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом СТА в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз» была успешно апробирована на примере моделируемого (учебного) пожара, что свидетельствует о достоверности полученных результатов и надежности предложенного методического подхода для решения сложной задачи по дифференциации первичных и вторичных очагов пожара в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз.

Заключение

Рассмотрены основные этапы методики «Диагностика формирования вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз». Методика распространяется на пожары с признаками формирования нескольких очаговых зон, горючей нагрузкой на которых выступают полимерные материалы различной химической природы, в том числе термопласты, способные плавиться, растекаться, капать и гореть, формируя вторичные очаги пожара.

Разработан и успешно апробирован способ оценки температуры и времени предварительного высокотемпературного воздействия на полимерные материалы методом СТА, основанный на получении эмпирических уравнений множественной линейной регрессии.

Описан применяемый в методике способ оценки возможности возгорания материала горючей нагрузки от капающих горящих масс термопластов (для изолированных очаговых зон) или после сопоставления распределения пожарной нагрузки по помещению с расположением очаговых зон (при наличии огневой связи).

Разработанная методика «Диагностика формирования вторичных очагов пожара при исследовании полимерных материалов методом синхронного термического анализа в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз» позволит экспертам судебных пожарно-технических экспертиз эффективно решать диагностические задачи при отработке версии о формировании ВОП, а также научно обоснованно и аргументированно отвечать на поставленные перед ними вопросы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беззапонная О. В., Глухих П. А., Макаркин С. В. Идентификация термопластичных полимеров методом синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2024. Т. 33, № 1. С. 24–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35. EDN: NONNIB.
2. Наймушин Е. В., Дементьев Ф. А., Минкин Д. Ю. Исследование гипса методом синхронного термического анализа для целей установления температурного режима нагрева // Технологии техносферной безопасности. 2013. № 6 (52). С. 1–6. EDN: SCFHST.
3. Методика комплексного исследования бетонов, подвергшихся термическому воздействию на пожаре / Д. В. Флегонтов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 36–43. EDN: VZETJH.
4. Корзанов В. С., Красновских М. П. Влияние термического воздействия на прочность бетона // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2020. Т. 10. Вып. 3. С. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284. EDN: MKYDAB.
5. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire // IABSE Conference: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Rotterdam, 2013. P. 112–113. DOI: 10.2749/222137813806474417.
6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol. 21. Iss. 12. P. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601.
7. Дашко Л. В., Синюк В. Д., Плотникова Г. В. Экспертное исследование цементного камня после высокотемпературного воздействия // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24, № 12. С. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32. EDN: VBUCJB.
8. Беззапонная О. В. Изучение особенностей развития пожара с использованием метода синхронного термического анализа // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31, № 5. С. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32. EDN: CSWEMZ.
9. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review / K. Candelier [et al.] // Annals of Forest Science. 2016. Vol. 73. Iss. 3. P. 571–583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x.
10. Беззапонная О. В. Оценка температуры воздействия на древесину в условиях пожара методами термического анализа // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 70–80. EDN: ORZBZF.
11. Принцева М. Ю., Лобатова О. В. Определение степени термического поражения лакокрасочных покрытий методом синхронного термического анализа // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11, № 2. С. 131–136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023. EDN: VOVQSC.
12. Диагностика температуры воздействия пожара на огнезащитные покрытия интумесцентного типа методами термического анализа / О. В. Беззапонная [и др.] // Техносферная безопасность. 2019. № 4 (25). С. 73–81. EDN: HOJFRJ.
13. Зельдович Я. Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М., 1984. 374 с.
14. Смелков Г. И. Пожарная безопасность электропроводок. М., 2009. 328 с.
15. Broido A. A. Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // Journal of Polymer Science. 1969. Pt. A-2. Vol. 7. No. 10. P. 1761–1773.
16. Беззапонная 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. EDN: QWMIMW.

17. Лобова С. Ф., Принцева М. Ю. Оценка влияния исходных данных на результаты моделирования распространения горения при оценке эффективности работы автоматической установки пожарной сигнализации // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2019. № 3. С. 70–80. EDN: OJDTYG

REFERENCES

1. Bezzaponnaya O. V., Makarkin S. V., Glukhikh P. A. Identification of thermoplastic polymers by method of synchronous thermal analysis // Fire and Explosion Safety. 2024. No. 33 (1). P. 24–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.24-35. EDN: NONNIB.

2. Naymushin E. V., Dementyev F. A., Minkin D. Yu. Study of gypsum by the method of synchronous thermal analysis for the purposes of establishing the heating temperature regime // Technologies of technosphere safety. 2013. No. 6 (52). P. 1–6. EDN: SCFHST.

3. Methodology for a comprehensive study of concrete exposed to thermal effects during a fire / D. V. Flegontov [et al.] // Modern problems of civil protection. 2019. No. 1 (30). P. 36–43. EDN: VZETJH.

4. Korzanov V. S., Krasnovskikh M. P. Effect of thermal exposure on the strength of concrete // Bulletin of Perm University. Series Chemistry. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284. EDN: MKYDAB.

5. Annerel E., Taerwe L. Damage assessment of concrete structures exposed to fire // IABSE Conference: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Rotterdam, 2013. P. 112–113. DOI: 10.2749/222137813806474417.

6. Samson G., Phelipot-Mardele A., Lanos C. Thermal and mechanical properties of gypsum-cement foam concrete: effects of surfactant // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol. 21. Iss. 12. P. 1–20. DOI: 10.1080/19648189.2016.1177601.

7. Dashko L. V., Sinyuk V. D., Plotnikova G. V. Expert study of cement stone after high-temperature exposure // Fire and Explosion Safety. 2015. Vol. 24. No. 12. P. 22–32. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.22-32. EDN: VBUCJB.

8. Bezzaponnaya O. V. Study of fire development features using the method of synchronous thermal analysis // Fire and Explosion Safety. 2022. Vol. 31. No. 5. P. 26–32. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.05.26-32. EDN: CSWEMZ.

9. Control of wood thermal treatment and its effects on decay resistance: a review / K. Candelier [et al.] // Annals of Forest Science. 2016. Vol. 73. Iss. 3. P. 571–583. DOI: 10.1007/s13595-016-0541-x.

10. Bezzaponnaya O. V. Assessment of the temperature of exposure to wood under fire conditions using thermal analysis methods // Technosphere Safety. 2020. No. 3 (28). P. 70–80. EDN: ORZBZF.

11. Printseva M. Yu., Lobatova O. V. Determination of the degree of thermal damage to paint and varnish coatings using the method of synchronous thermal analysis // XXI century: results of the past and problems of the present plus. 2022. Vol. 11. No. 2. P. 131–136. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0023. EDN: VOVQSC.

12. Diagnostics of fire exposure temperature on intumescent fire-protective coatings using thermal analysis methods / O. V. Bezzaponnaya [et al.] // *Technosphere Safety*. 2019. No. 4 (25). P. 73–81. EDN: HOJFRJ.
13. Zeldovich Ya. B. *Selected Works. Chemical Physics and Hydrodynamics*. Moscow, 1984. 374 p.
14. Smelkov G. I. *Fire Safety of Electrical Wiring*. Moscow, 2009. 328 p.
15. Broido A. A. Simple, Sensitive Graphical Method of Treating Thermogravimetric Analysis Data // *Journal of Polymer Science*. 1969. Pt. A-2. Vol. 7. No. 10. P. 1761–1773.
16. Bezzaponnaya O. V. Evaluation of kinetic parameters of thermal-oxidative destruction of polymeric materials for solving fire-technical expertise problems // *Problems of Risk Management in the Technosphere*. 2025. No. 1 (73). P. 166–174. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-166-174. EDN: QWMIMW.
17. Lobova S. F., Printseva M. Yu. Assessment of the influence of initial data on the results of modeling the spread of combustion when assessing the efficiency of an automatic fire alarm system // *Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*. 2019. No. 3. P. 70–80. EDN: OJDTYG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беззапонная Оксана Владимировна, канд. техн. наук, доцент, почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 119257; Scopus Author ID: 6504618195; Researcher ID: R-8727-2019; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Глухих Павел Александрович, старший преподаватель кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Елфимова Марина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника Уральского института ГПС МЧС России по научной работе (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003; e-mail: elfimar@mail.ru

Макаркин Сергей Викторович, канд. юрид. наук, доцент, начальник кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); Author ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: serge.makarkin@yandex.ru

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 Expertise, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian

Federation); ID RSCI: 119257; Scopus Author ID: 6504618195; Researcher ID: R-8727-2019; ORCID: 0000-0001-6566-448X; e-mail: bezzaponnay@mail.ru

Pavel A. Glukhikh, Senior Lecturer of the Department of Criminalistics and Engineering Expertise, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 814811; ORCID: 0009-0000-9084-8328; e-mail: pasa.86@mail.ru

Marina V. Elfimova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Institute for Scientific Work, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 818459; ORCID: 0000-0003-3835-9003; e-mail: elfimar@mail.ru

Sergey V. Makarkin, Cand. Sci. (legal), Associate Professor, Head of the Department of Criminalistics and Engineering Expertise, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); Author ID: 374148; ORCID: 0009-0001-8268-5677; e-mail: serge.makarkin@yandex.ru