Научная статья
УДК 614.841.2.001.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-116-130

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Моторыгин Юрий Дмитриевич;
Ивахнюк Григорий Константинович;
✉Бельшина Юлия Николаевна.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
✉belshina.y@igps.ru

Аннотация. Рассмотрены возможности метода синхронного термического анализа, совмещённого с инфракрасной спектроскопией, для оценки пожароопасных свойств полимерных материалов на примере двух поливинилхлоридных материалов, представляющих собой кварц-виниловую плитку и полотно для натяжного потолка. Исследование проводилось на синхронном термоанализаторе NETZSCH STA 449 F3 Jupiter при скорости нагрева 20 °C/мин до 900 °C в атмосфере воздуха с одновременным анализом летучих продуктов с помощью ИК-Фурье-спектрометра ФСМ-1201. Установлено, что за счет содержания дополнительного органического наполнителя (древесной муки), кварц-винил разлагается в четыре этапа, причём первый этап (≈287 °C) характеризующийся экзотермическим пиком на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии, сопровождается интенсивным выделением HCl, CO и CO_2, что свидетельствует о возможном пламенном горении. Полотно натяжного потолка (пластифицированный поливинилхлорид без горючих наполнителей) разлагается по характерной для ПВХ-пластиков схеме в три этапа; до температур выше 405 °C активное выделение газообразных продуктов не сопровождается наличием экзотермических пиков на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии, что говорит об отсутствии пламенного горения. Показано, что динамика выделения газообразных карбонильных соединений, HCl, CO и CO_2, определяемая по характеристическим полосам в ИК-спектрах, позволяет выявить температурные и временные интервалы, в которых возможно возникновение пламенного горения рассмотренных материалов. Сделан вывод, что метод СТА–ИКС даёт объективную информацию о термоокислительной деструкции полимеров, тепловых эффектах, кинетике газовыделения и может использоваться для оценки пожарной опасности материалов и прогнозирования их поведения на пожаре.

Ключевые слова: пожароопасные свойства, полимерные материалы, синхронный термический анализ, инфракрасная спектроскопия

Для цитирования: Моторыгин Ю.Д., Ивахнюк Г.К., Бельшина Ю.Н. Возможности метода синхронного термического анализа для оценки пожароопасных свойств полимерных материалов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 3 (79). С. 116–130. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-116-130

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Scientific article

POSSIBILITIES OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS FOR ASSESSING THE FIRE HAZARD PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS

Motorygin Yuri D.;
Ivakhnyuk Grigory K.;
✉**Belshina Yulia N.**
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
✉***belshina.y@igps.ru***

Abstract. The article discusses the possibilities of the synchronous thermal analysis method combined with infrared spectroscopy to assess the fire-hazardous properties of polymer materials using the example of two polyvinyl chloride materials, which are quartz-vinyl tiles and canvas for a stretch ceiling. The study was carried out on a synchronous thermal analyzer NETZSCH STA 449 F3 Jupiter at a heating rate of 20 °C/min to 900 °C in an atmospheric atmosphere with simultaneous analysis of volatile products using an IR Fourier spectrometer FSM-1201. It has been established that due to the content of an additional organic filler (wood flour), quartz vinyl decomposes in four stages, with the first stage (≈287 °C) characterized by an exothermic peak on the DSC curve, accompanied by intense release of HCl, CO and Co_2, which indicates possible flaming. The stretch ceiling fabric (plasticized PVC without combustible fillers) decomposes according to the scheme typical for PVC plastics in three stages; Up to temperatures above 405 °C, the active release of gaseous products is accompanied by the presence of exothermic peaks on the DSC curve, which indicates the absence of flaming . It is shown that the dynamics of the release of gaseous carbonyl compounds, HCl, CO, and co_2, determined by the characteristic bands in the IR spectra, allows us to identify temperature and time intervals in which the occurrence of flame combustion of the materials under consideration is possible. It is concluded that the STA–X method provides objective information on the thermal and oxidative degradation of polymers, thermal effects, and kinetics of gas release and can be used to assess the fire hazard of materials and predict their behavior in a fire.

Keywords: flammable properties, polymer materials, synchronous thermal analysis, infrared spectroscopy

For citation: Motorygin Yu.D., Ivakhnyuk G.K., Belshina Yu.N. Possibilities of synchronous thermal analysis for assessing the fire hazard properties of polymer materials // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 3 (79). P. 116–130. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-116-130

Введение

В настоящее время материалы на основе синтетических полимеров применяются практически повсеместно, в самых разных областях. Путем направленного выбора функциональных компонентов современные технологии позволяют создавать материалы, обладающие широким ассортиментом эксплуатационных свойств, в том числе высокой механической прочностью и твердостью, износостойкостью, ударопрочностью, эластичностью и упругостью, а также устойчивостью к различным агрессивным средам [1]. Применение синтетических полимерных материалов активно расширяется и в первую очередь это касается производства строительных и отделочных материалов. Их основным недостатком является то, что практически все они относятся к горючим материалам с высокой теплотворной способностью, кроме того, влияние на динамику развития горения материалов на основе синтетических полимеров принципиально отличается от поведения прочих твердых органических материалов [2–3]. Значительное влияние полимерных материалов на динамику развития горения на пожаре связано с тем, что многие из них характеризуются экстремально высокой скоростью тепловыделения, что может спровоцировать резкий скачок температуры,

ускоряющий возникновение эффекта общей вспышки в помещении [3, 4]. Возникающий мощный лучистый тепловой поток ускоряет пиролиз соседних поверхностей, еще не охваченных огнем. Полимерные покрытия, кабельная изоляция и отделочные панели способствуют распространению пламени по вертикальным поверхностям. Термопласты (полиэтилен, полипропилен, полистирол) при нагреве плавятся, горящие капли стекают вниз, создавая вторичные очаги горения, резко увеличивая площадь пожара. При горении материалов на основе полимеров формируется дым с высоким выходом углеродистых частиц (сажи), особенно это характерно для пластиков на основе стирола (АБС-пластик, полистирол) или ароматических полиэфиров. Отдельно следует отметить токсичность продуктов термического разложения полимеров. Например, азотсодержащие полимеры (пенополиуретаны, полиамиды) при горении выделяют циановодород, поливинилхлорид (ПВХ) – хлороводород, фторполимеры – фтороводород и фосген. Кумулятивный эффект сочетания угарного газа и продуктов разложение полимеров делает среду смертельной практически мгновенно [4]. Наличие большого количества полимерных материалов приводит к трансформации традиционной динамики развития пожара. Из-за легкоплавкости и низкой температуры воспламенения материалов на основе синтетических полимеров сокращается начальная стадия развития горения, период тления практически исчезает. Из-за активного выделения продуктов разложения полимеров пожар практически мгновенно переходит в режим, регулируемый вентиляцией, что приводит к таким явлениям, как обратная тяга или объемная вспышка.

Таким образом, постоянное расширение ассортимента и областей применения, приводящее практически к повсеместному использованию полимерных материалов, существенно влияет на пожарную безопасность, поэтому поиск методов оценки их пожароопасных свойств, позволяющих прогнозировать поведение на пожаре и проводить реконструкцию процессов развития горения из очага при проведении пожарно-технических экспертиз, не теряет своей актуальности.

Традиционно, при возникновении вопросов, связанных с пожарной опасностью материалов, подразумевается оценка показателей пожаровзрывоопасности, которые определяются по методикам, утвержденным национальными стандартами, подразумевающим использование испытательных установок и оборудования, а также определяющим требования к исследуемым образцам материалов. Так к показателям пожаровзрывоопасности полимерных материалов, характеризующих их энергетические характеристики, относятся скорость тепловыделения и общее тепловыделение, которые определяются в соответствии с ГОСТ Р 57928–2017[1]. К показателям, характеризующим воспламеняемость полимерных материалов, относятся температура воспламенения, температура самовоспламенения, кислородный индекс (КИ), а также классификация материалов по категориям горючести на горючие, трудногорючие и негорючие. К определяющим токсическую опасность – коэффициент дымообразования. К характеризующим процесс распространения пламени – индекс распространения пламени. Эти характеристики определяются экспериментально по методикам ГОСТ 12.1.044–2018[2]. К показателям, характеризующим распространение горения, относится также индекс скорости роста пожара (FIGRA), определяемый в соответствии с ГОСТ Р 59137–2020[3]. Зависимость от условий проведения испытаний и геометрии образцов не позволяет отнести данные показатели к физическим константам полимерных материала, они предназначены для их классификации. При проведении исследований в рамках пожарно-

[1] ГОСТ Р 57928–2017. Композиты полимерные. Метод определения тепловыделения при горении с использованием проточного калориметра, работающего по термопарному принципу. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

[2] ГОСТ 12.1.044–2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

[3] ГОСТ Р 59137–2020. Классификация пожарной опасности строительных материалов и конструкций. Часть 1. Классификация на основе результатов испытаний по определению реакции на огонь. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

технических экспертиз провести испытания с образцами, удовлетворяющими требования ГОСТа по массе и размеру, часто является задачей невыполнимой. Тем не менее практика проведения экспертных исследований показывает, что вопросы отнесения образцов к определенной группе по показателям пожаровзрывоопасности довольно часто встречаются при назначении пожарно-технических экспертиз, при этом фактически требуемая для ответа на поставленные вопросы информация не столько касается классификации материала, сколько оценки с помощью аналитических методов его физико-химических свойств, определяющих поведение при внешнем термическом воздействии, которое позволяет оценить его пожарную опасность в точки зрения влияния на общую динамику развития горения из очага. Для этих целей наиболее применим синхронный термический анализ (СТА), объединяющий термогравиметрию (ТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК). Он позволяет одновременно фиксировать потерю массы, динамику газовыделения и тепловые эффекты в ходе одного эксперимента в одинаковых условиях. ТГ позволяет количественно оценить термостабильность материала с помощью значений температуры потери фиксированной массы (T_5, T_{50} и т.д.) и величины зольного (коксового) остатка. Также на основе ТГ анализа и результатов его дифференцирования проводится расчет кинетических параметров разложения материала при нагреве, а именно энергия активации, предэкспоненциального множителя и порядка реакции [6, 7]. Через измерение выделяемого (поглощаемого) тепла, метод ДСК помогает понять механизмы протекающих в материале процессов.

В ряде работ предлагается использовать метод синхронного термического анализа (СТА) как альтернативу испытательным методам оценки показателей пожаровзрывоопасности. Так в ГОСТ 31251–2008[4] при реализации СТА по схеме термогравиметрия (ТГ) – дифференциальный термический анализ для отдельных материалов по температурам фиксируемых экзотермических пиков предлагается оценивать температуры воспламенения и самовоспламенения. Аналогичные попытки предпринимаются и по поиску корреляция между характеристиками воспламеняемости и температурными параметрами, определяемыми при анализе кривых ДСК и ТГ [8]. Наконец, по величине коксового остатка для полимеров предлагается приблизительно с помощью эмпирического уравнения Ван Кревелена оценивать КИ [9–10]. При этом во всех случаях установленные корреляции справедливы только для очень ограниченного круга объектов и не могут быть применены для широкого ассортимента полимерных материалов. Необходимо понимать, что исследуемые методом СТА пробы массой порядка 10 мг не позволяют судить о поведении материала на пожаре в полной мере, поскольку не учитывают его структуру, плотность и теплопроводность. Кроме того, для полимерных материалов, содержащих значительное количество функциональных наполнителей, отобрать представительную пробу при таких малых количествах исследуемого образца достаточно сложно, тем более что многие современные полимерные материалы не отличаются гомогенностью.

Таким образом, с помощью СТА нельзя достоверно определить нормативно установленные показатели пожаровзрывоопасности полимерных материалов, но объективно можно изучить поведение материала при нагреве, определить характеристики термостабильности материала, температуры начала и достижения максимальной скорости (по кривой ДТГ) протекающих в нем при нагреве физических и химических превращений, их тепловые эффекты и кинетические характеристики, что позволяет судить о возможности развития цепного механизма термоокислительной деструкции, сопровождающегося пламенным горением и, следовательно, характеризировать их пожарную опасность [6–10]. Объективность оценки пожарной опасности материалов по результатам СТА значительно возрастает при синхронизации его с методами определения, например, инфракрасной спектроскопией (ИКС) [11–12]. Сочетание СТА с ИКС позволяет проводить качественный анализ летучих соединений в составе продуктов термического разложения для оценки наличия горючих газов.

[4] ГОСТ 31251–2008. Стены наружные с внешней стороны. Метод испытаний на пожарную опасность. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»

Целью работы являлось изучение методом СТА, сопряжённого с ИКС, характеристик термической деструкции и состава газообразных продуктов, выделяющихся в процессе разложения материалов на основе синтетических полимеров на примере ПВХ-пластиков, для оценки их пожарной опасности.

Методы исследования

В качестве объектов исследования в работе были рассмотрены кварц-виниловая плитка и полотно для натяжного потолка. Оба образца представляют собой полимерные материалы на основе ПВХ, который в обоих случаях играет роль связующего. Образец кварцвинила представлял собой многослойный материал, состоящий из базового слоя серого цвета, декоративного и защитного (прозрачного) слоев. В базовом слое кварцвиниловой плитки, из которого отбиралась проба, содержится помимо ПВХ до 80 % наполнителя, в основном минерального, в качестве которого применяются оксид кремния или известняк. Образец полотна натяжного потолка представлял собой эластичный пленочный материал белого цвета с глянцевой поверхностью. Материал такого полотна обычно содержит наполнитель (до 10 %) и фталатный пластификатор, содержание которого может достигать 30–40 %.

Термический анализ образцов выполнялся на синхронном ТГ/ДСК термоанализаторе NETZSCH STA 449 F3 Jupiter в атмосфере воздуха при скорости нагрева 20 °С/мин и в интервале значений температуры от 35 до 900 °С. Масса исследуемых образцов составляла 6,5–7,0 мг. Выделяющиеся летучие продукты анализировали с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ 1201 с газовой кюветой ТГА-100 со стеклами из селенида цинка. Анализ выделяющихся газов проводили при продувке воздухом со скоростью 100 мл/мин через нагретую до 200 ℃ транспортную газовую линию с целью предотвращения конденсации летучих газов, образующихся в процессе термоокислительного разложения материалов.

Как известно, показателем динамики образования газообразных продуктов на каждом этапе разложения полимерного материала может являться профиль выделяемого газа, расчитанный по результатам ИКС, совмещенной с СТА, с применением ортогонализации Грамма-Шмидта[5] [12]. В настоящей работе были рассмотрены профили выделения отдельных продуктов теромокислительной деструкции рассмотренных полимерных материалов по соответствующим им характеристическим полосам поглощения на ИК-спектрах.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам СТА разложение кварц-виниловой плитки начинается при температуре порядка 270 °С, по результатам дифференциирования кривой ТГ (кривая ДТГ) можно увидеть четыре этапа разложения, характеризующиеся разной скоростью и тепловыми эффектами (рис. 1, 2). Последний четвертый этап связан с разложением карбонатов в составе материала и говорит о присутствии в составе материала в качестве наполнителя известняка, с точки зрения прожарной опасности материала он не представляет интереса. Наиболее большая скорость потери массы образца фиксируется на первом этапе при 287 °С. Данному этапу на кривой ДСК соответствует экзотермический пик. Второй этап разложения начинается при 404 °С и достигает максимальной скорости 3,4 %/мин при температуре 422 °С. Данный этап также характеризуется экзотермическим пиком на кривой ДСК. Третий этап разложения наблюдается в диапазоне 500–600 °С, он характеризуется относительной низкой скоростью потери массы и на кривой ДСК соотвестует перегибу у основания экзотермического пика, связанного с разложением кварцвинила на предыдущем этапе разложения. Образец для натяжного полотна разлагается в три этапа, все они очевидно связаны с органическими компонентами материала (рис. 3, 4). Первый этап начинается при температуре 281 °С он сопровождается потерей массы на 61,5 %, максимальная скорость разложения на данном

[5] ГОСТ Р 57988–2017. Композиты полимерные. Термогравиметрический анализ, совмещенный с анализом методом инфракрасной спектроскопии (ТГА/ИК)

этапе 25,8 %/мин. Процессы, протекающие в материале на данном этапе, сопровождаются поглощением тепла, о чем свидетельствует два эндотермических пика низкой интенсивности на кривой ДСК. Активное выделение тепла наблюдается на втором и третьем этапе разложения материала, которые фиксируются на кривых ТГ и ДТГ в интервалах температур 405–460 °С и 500–600 °С. Остаточная масса для образца кварцвинила составляет 42,0 %, для полотна натяжного потолка – 9,9 %. Таким образом, поведение материалов при нагреве не совпадает не на одном из этапов, несмотря на наличие в них в качестве осносного компонента поливинилхлорида. Кварцвиниловые плитки, интенсивно разлагающиеся на первом этапе с выделением тепла, можно считать склонными к горению, в то время как полотно натяжного потолка по визуальному анализу термоаналитических кривых не должно воспламеняться до температуры нагрева выше 445 °С.

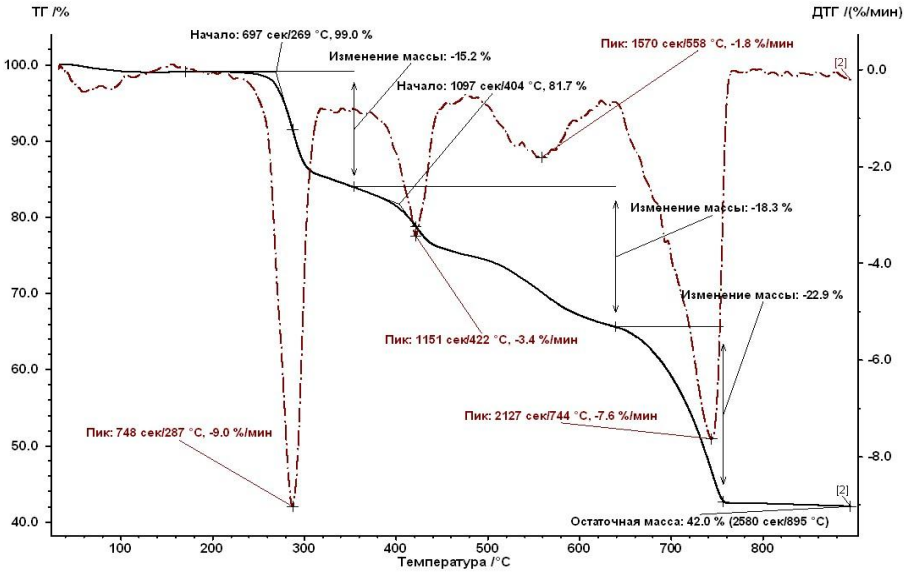


Рис. 1. **Термоаналитические кривые ТГ и ДТГ образца кварцвиниловой плитки**

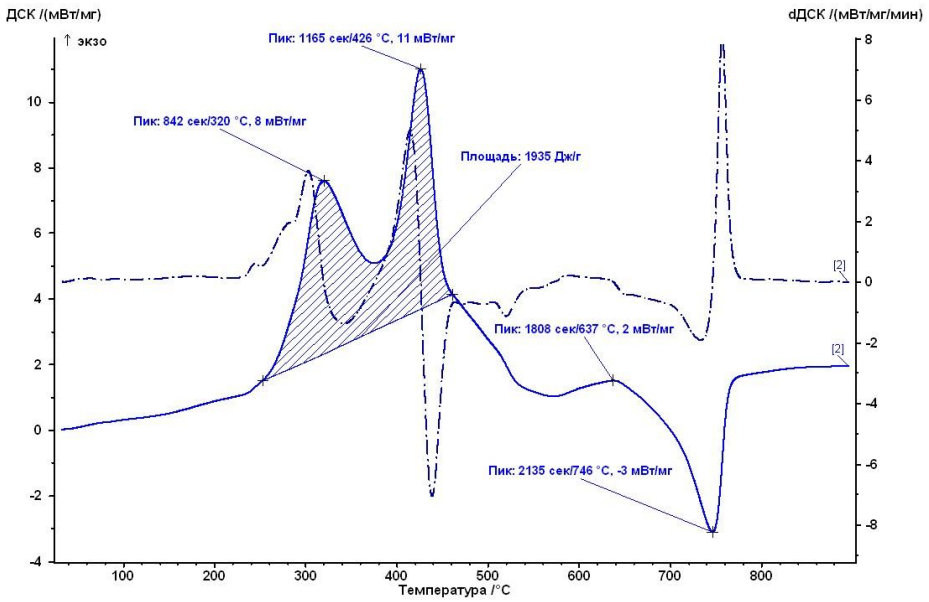


Рис. 2. **Термоаналитическая кривая (ДСК) и ее первая производная (dДСК) образца кварцвиниловой плитки**

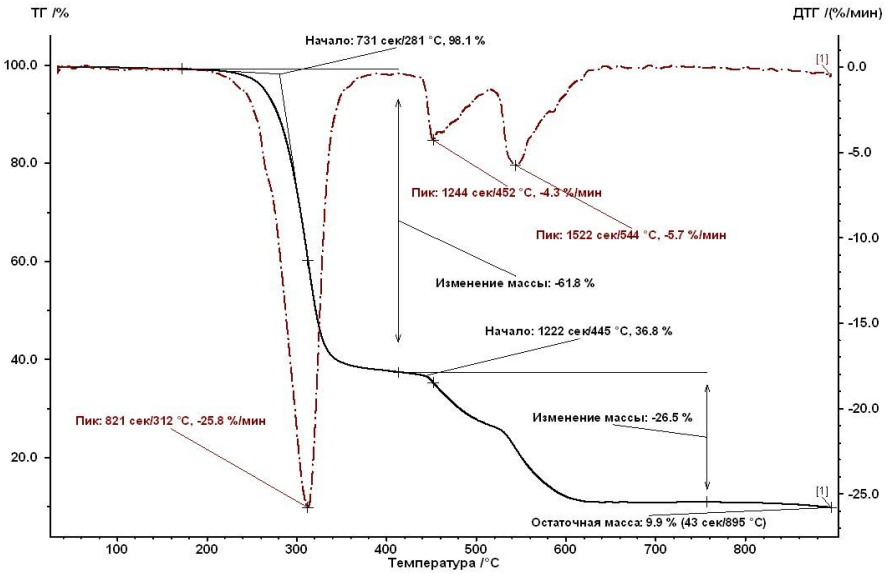


Рис. 3. **Термоаналитические кривые ТГ и ДТГ образца полотна натяжного потолка**

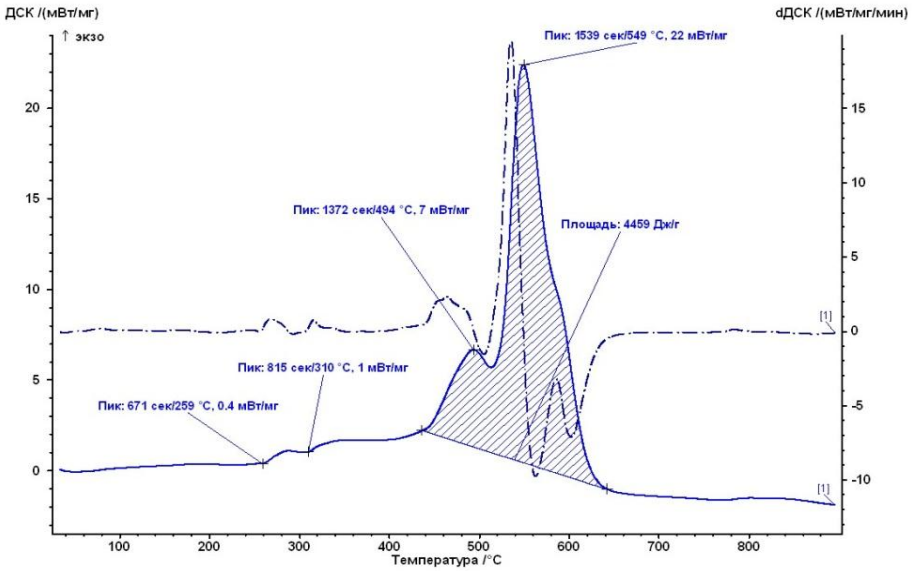


Рис. 4. **Термоаналитическая кривая (ДСК) и ее первая производная (dДСК) образца натяжного потолка**

Возможность возникновения пламенного горения рассматриваемых образцов при наличии источника зажигания будет определяться наличием горючих летучих веществ, выделяющихся при нагреве. Потеря массы на кривых ТГ для обоих образцов фиксируется при нагреве до 260–280 ^{o}C, выделяющиеся при этом летучие газообразные вещества состоят из диоксида углерода и воды, о чем свидетельствуют их ИК-спектры. При этом в области ~2 960 см$^{-1}$ начинают проявляться характеристические полосы поглощения, относящиеся к хлороводороду (рис. 5). Из литературы известно, что отщепление хлора от углеродной цепи ПВХ происходит при температурах выше 130 ^{o}C. Поскольку схема сопряжения прибора СТА и ИК-спектрометра предполагает использования в оптической схеме стекол из селенида цинка, то увидеть характеристические полосы поглощения, связанные со связью C-Cl, находящие в области до 650 см$^{-1}$, не представляется возможным. Также начинают проявляться признаки присутствия карбонильной группы (полоса 1732 см$^{-1}$).



Рис. 5. **ИК-спектры летучих соединений, выделяющихся в начале первого этапа термического разложения образцов**

При температуре, соответствующей максимальной скорости потери массы на первом этапе разложения, характер спектров газообразных продуктов существенно усложняется (рис. 6). При визуальном анализе полученных термограмм сложно представить, что оба образца представляют собой материалы на основе ПВХ, полученные же ИК-спектры это подтверждают. В обоих случаях при температуре нагрева, соответствующей максимальной скорости потери массы, на ИК-спектрах газообразных продуктов присутствуют четкие признаки газообразного HCl, образующегося при термическом разложении ПВХ [13–15] – симметричные группы полос в диапазонах 2870–2550 $см^{-1}$ и 3100–2875 $см^{-1}$, последние частично перекрываются полосой метильной группы. Полосы 3070 $см^{-1}$ и 1653 $см^{-1}$ говорят о присутствии в составе летучих продуктов разложения соединений, содержащих двойные C=C связи. Первая из этих полос в сочетании с характеристическими полосами карбонильной группы при ~1736 $см^{-1}$ говорит о наличии в составе выделяющихся газов молекул испаряющихся фталатных пластификаторов, частично разлагающихся с образованием фталевого ангидрида (полоса 1795 $см^{-1}$).

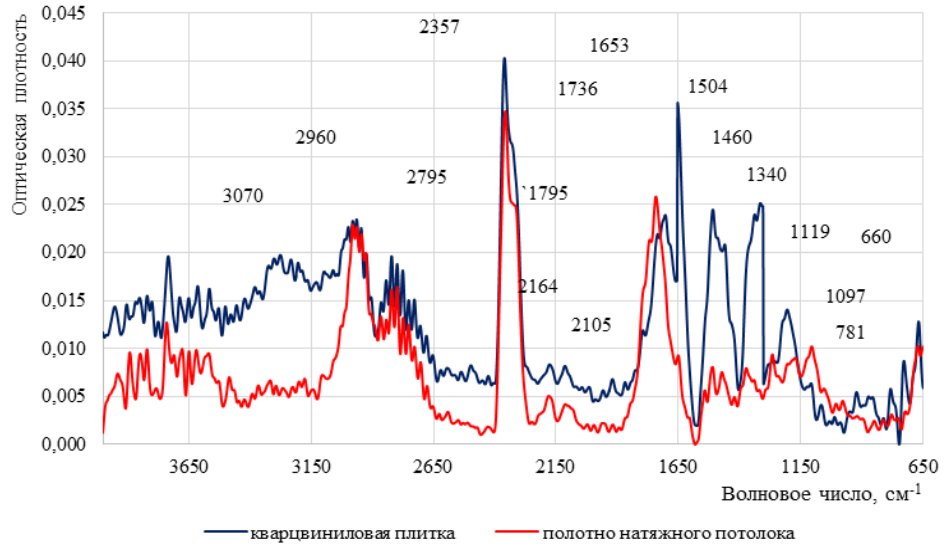


Рис. 6. **ИК-спектры продуктов разложения образцов при достижении максимальной скорости разложения на 1 этапе**

Последующие этапы разложения выбранных для исследования полимерных материалов сопровождаются выделением воды, оксида углерода (характеристические полосы на ИК-спектре 2165 и 2105 $см^{-1}$) и диоксида углерода (полосы 2357 и 2318 $см^{-1}$). На рис. 7 приведен ИК-спектр газообразных продуктов разложения рассмотренных в работе полимерных материалов при температуре, соответствующей максимальной скорости потери массы на втором этапе. Спектры, полученные для последующих этапов разложения, аналогичны и отличаются только относительной интенсивностью характеристических полос поглощения для разных образцов.



Рис. 7. **ИК-спектры продуктов разложения образцов при достижении максимальной скорости разложения на втором этапе**

Для анализа динамики образования газообразных продуктов разложения при нагреве материалов на основе ПВХ были построены профили изменения количества в составе летучих компонентов, содержащих карбонильную группу, а также CO_2, CO и HCl по соответствующим им характеристическим полосам поглощения на ИК-спектрах (рис. 8–11).

Выделение CO_2 соответствует основным стадиям разложения рассмотренных материалов при нагреве. В обоих случаях профиль динамики выделения газа в период протекания первого этапа разложения (данный период на рис. 8 выделен пунктиром) характеризуются наличием двух перекрывающихся максимумов. Такая картина связана с разложением пластификаторов и других органических соединений в составе материалов. Для образца кварцвинила второй из этих пиков, по сути, является плечом последующего интенсивного максимума, наблюдаемого в температурном диапазоне второго этапа разложения данного материала в диапазоне 405–460 °C. Как известно, в состав композиций для изготовления кварцвиниловых плиток помимо ПВХ, пластификатора и стабилизатора входят дополнительные органические компоненты, например, влияющие на механические свойства плитки (акриловые сополимеры), облегчающие переработку материала или играющие роль наполнителя (древесная мука) [16]. Их содержание в составе материала может быть существенным (до 10 %), а процесс разложения уже при относительно низких температурах сопровождаться пламенным горением. Характер кривых ТГ и ДСК при нагреве выше 280 °C позволяет утверждать, что происходит горение материала, для нивелирования которого образующихся продуктов дегидрохлорирования ПВХ недостаточно. Выделяющееся при этом тепло ускоряет термическую деструкцию ПВХ и приводит к практически полному выгоранию его и других органических компонентов материала при температуре в печи прибора СТА ниже 500 °C. Образующийся угольный остаток выгорает в диапазоне 500–600 °C, о чем свидетельствует динамика образования CO_2,

но поскольку количество угольного остатка незначительно – процесс его выгорания практически не заметен на кривой ДСК (рис. 2). Данные выводы подтверждает динамика содержания в газообразных продуктах разложения оксида углерода (II) (рис. 9). Выделение его на первой стадии разложения материалов связано с термоокислительной деструкцией органических компонентов. В последующем для материала кварцвиниловой плитки наблюдается его активное выделение на 1100–1200 с проведения СТА, что соответствует второму этапу разложения и также подтверждает горение, обусловленное наличием в материале функциональных органических компонентов, вероятнее всего древесной муки. Для образца полотна натяжного потолка активное выделение CO наблюдается на 1300–1700 с, что соответствует 2 и 3 этапам разложения при температурах более 450 °C и связано с выгоранием продуктов дегидрохлорирования и последующей термоокислительной деструкции ПВХ.

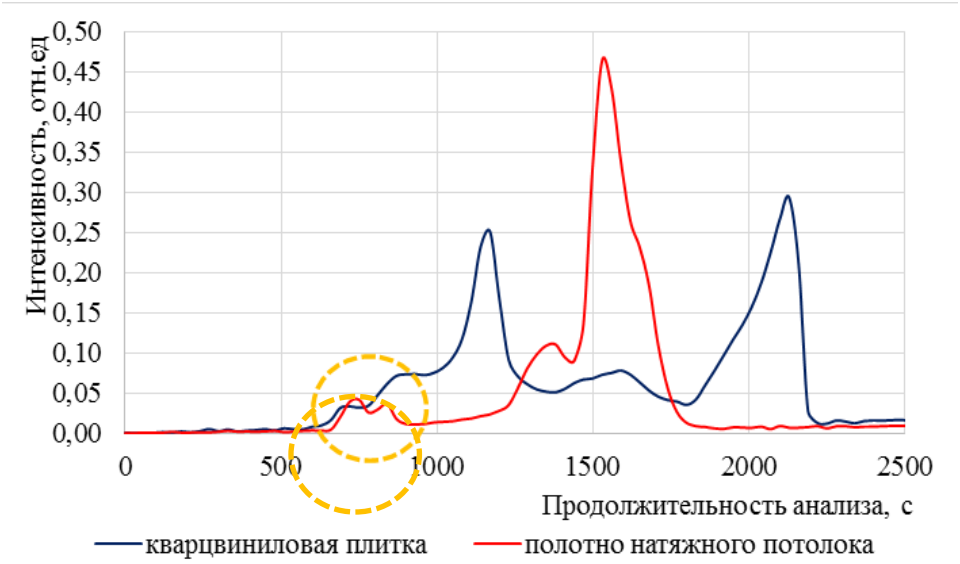


Рис. 8. **Динамика изменения в составе продуктов разложения материалов на основе ПВХ диоксида углерода (CO_2)**

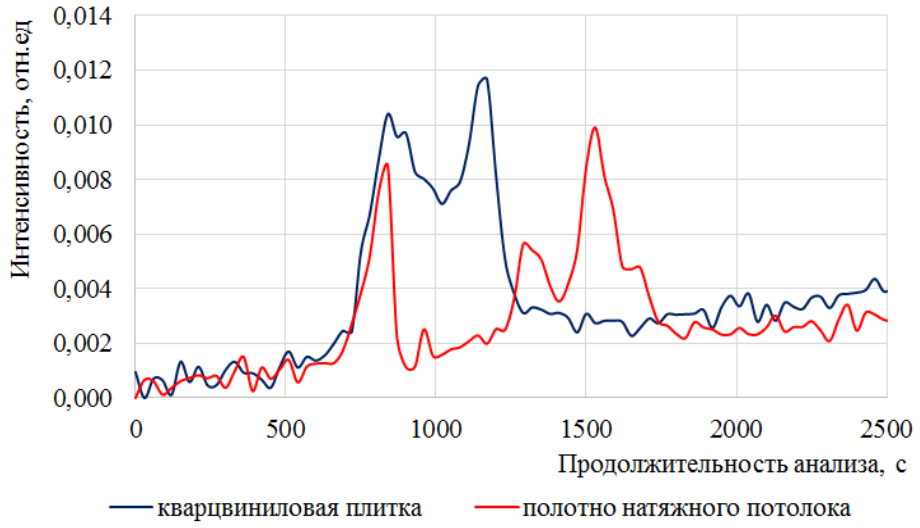


Рис. 9. **Динамика изменения в составе продуктов разложения материалов на основе ПВХ оксида углерода (CO)**

Динамика выделение хлороводорода (рис. 10) и соединений, содержащих карбонильную группу (рис. 11), визуально схожа. Для обоих материалов процессы, связанные с их появлением в составе газообразных продуктов, полностью завершаются на первом этапе разложения.



Рис. 10. **Динамика изменения в составе продуктов разложения материалов на основе ПВХ хлороводорода (HCl)**



Рис. 11. **Динамика изменения в составе продуктов разложения материалов на основе ПВХ соединений, содержащих карбонильную группу**

Таким образом, метод СТА, совмещенный с ИК-спектроскопией позволяет на основе данных о процессах, протекающих в материалах при нагреве, а также составе и динамике образования летучих продуктов деструкции оценивать пожароопасные свойства материалов на основе синтетических полимеров, а именно делать вывод о возможности возникновения пламенного горения в различных температурных и временных диапазонах термического воздействия.

Заключение

Проведенные исследования материалов на основе ПВХ, а именно кварцвиниловой плитки и полотна для натяжных потолков, показали, что СТА, совмещенный с ИК-спектроскопией выделяющихся газообразных продуктов разложения позволяет получать объективную информацию о протекающих в них при нагреве процессах и через их динамику и наблюдаемые тепловые эффекты характеризовать пожароопасные свойства материалов. Для рассмотренных в работе образцов наблюдаемые различия в поведении при нагреве связаны с различием в составе, а именно в наличии в составе материала кварцвиниловой плитки значительного количества органических добавок, вероятно, древесной муки, процессы термического разложения которых протекают с высокой скоростью и сопровождаются значительным выделение тепла. Это приводит к выгоранию ПВХ связующего при значительно более низких температурах в печи прибора, чем для материалов из пластифицированного ПВХ, в составе которых присутствует только минеральный наполнитель, в данном случае – полотна для натяжного потолка. С помощью СТА удалось установить температурные и временные диапазоны пламенного горения рассмотренных ПВХ-пластиков.

Как показал анализ литературных источников, достаточно большое количество исследований направлено на установление корреляций между результатами СТА и показателями пожаровзрывоопасности материалов. При этом результаты исследования процессов, протекающих в образцах при нагреве, методом СТА, совмещенным с ИК-спектроскопией газообразных продуктов деструкции, и определяемые с его помощью термофизические и физико-химические свойства являются полноценными характеристиками пожарной опасности, которые могут применяться при прогнозировании влияния полимерных материалов на динамику развития пожара.

Список источников

1. Кудинов В.В., Корнеева Н.В., Крылов И.К. Влияние компонентов на свойства полимерных композиционных материалов: монография-справочник. М.: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука», 2021. 134 с. EDN FQFUJI. DOI: 10.7868/9785020408654

2. Руководство по разработке композиций на основе ПВХ / под ред. Ричарда Ф. Гроссмана; пер. с англ. под ред. В.В. Гузеева. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 606 с.

3. Гаращенко А.Н., Берлин А.А., Кульков А.А. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30

4. Об определении теплот сгорания и тепловыделения при горении полимерных материалов / С.Л. Барботько [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 5. С. 25–32. EDN PAINFX.

5. Илларионова Л.В., Аносова Е.Б. Токсическая и пожарная опасность современных синтетических материалов, применяющихся в строительстве // Химическая безопасность. 2017. Т. 1. № 2. С. 176–182. EDN YMWMPA. DOI: 10.25514/CHS.2017.2.10992

6. A Simple Direct Method to Obtain Kinetic Parameters for Polymer Thermal Decomposition / D. Lázaro [et al.] // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 11300. DOI: 10.3390/app112311300

7. Al-Yaari M., Dubdub I. Pyrolytic Behavior of Polyvinyl Chloride: Kinetics, Mechanisms, Thermodynamics, and Artificial Neural Network Application // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 4359. DOI: 10.3390/polym13244359

8. Беззапонная О.В. Определение температуры самовоспламенения веществ и материалов методом синхронного термического анализа // Технологии техносферной безопасности. 2024. № 2 (104). С. 177–187. EDN WGCMMY. DOI: 10.25257/TTS.2024.2.104.177-187

9. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами / А.В. Иванов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68. EDN HMLHQR. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

10. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса / О.В. Беззапонная [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 12. С. 14–24. EDN YMJWPW. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24

11. Термический анализ отделочных строительных материалов и инфракрасная спектроскопия газообразных продуктов их термической деструкции / Е.В. Чернушевич [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 6 (40). С. 119–123. EDN WZBFYR. DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.004

12. Принцева М.Ю., Бельшина Ю.Н., Умрихина М.Ю. Влияние климатических факторов на характеристики термической деструкции и состав газообразных продуктов разложения огнезащитного вспучивающего покрытия // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 112–124. EDN LXYIQY. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-112-124

13. Yang S., Wang Yu., Man P. Kinetic Analysis of Thermal Decomposition of Polyvinyl Chloride at Various Oxygen Concentrations // Fir. 2023. Vol. 6. P. 404. DOI: 10.3390/fire6100404

14. Systematic study on the combustion behavior and gaseous product emissions of typical plastics and their blends / L. Jishuo [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 202. p.B. P. 107755. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107755

15. Lopez E.C.R. Pyrolysis of Polyvinyl Chloride, Polypropylene, and Polystyrene: Current Research and Future Outlook // Eng. Proc. 2023. Vol. 56. P. 44. DOI: 10.3390/ASEC2023-15376

16. Влияние наполнителей ПВХ-покрытия целлюлозосодержащих текстильных материалов на эффективность их огнезащиты / С.А. Сырбу [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 2 (416). С. 181–195. EDN TFQZUC. DOI: 10.47367/0021-3497_2025_2_181

References

1. Kudinov V.V., Korneeva N.V., Krylov I.K. Vliyanie komponentov na svojstva polimernyh kompozicionnyh materialov: monografiya-spravochnik. M.: Akademicheskij nauchno-izdatel'skij, proizvodstvenno-poligraficheskij i knigorasprostranitel'skij centr «Nauka», 2021. 134 s. EDN FQFUJI. DOI: 10.7868/9785020408654

2. Rukovodstvo po razrabotke kompozicij na osnove PVH / pod red. Richarda F. Grossmana; per. s angl. pod red. V.V. Guzeeva 2-e izd. SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2009. 606 s.

3. Garashchenko A.N., Berlin A.A., Kul'kov A.A. Sposoby i sredstva obespecheniya trebuemyh pokazatelej pozharobezopasnosti konstrukcij iz polimernyh kompozitov (obzor) // Pozharovzryvobezopasnost'. 2019. T. 28. № 2. S. 9–30. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.02.9-30

4. Ob opredelenii teplot sgoraniya i teplovydeleniya pri gorenii polimernyh materialov / S.L. Barbot'ko [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2012. T. 21. № 5. S. 25–32. EDN PAINFX.

5. Illarionova L.V., Anosova E.B. Toksicheskaya i pozharnaya opasnost' sovremennyh sinteticheskih materialov, primenyayushchihsya v stroitel'stve // Himicheskaya bezopasnost'. 2017. T. 1. № 2. S. 176–182. EDN YMWMPA. DOI 10.25514/CHS.2017.2.10992

6. A Simple Direct Method to Obtain Kinetic Parameters for Polymer Thermal Decomposition / D. Lázaro [et al.] // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 11300. DOI: 10.3390/app112311300

7. Al-Yaari M., Dubdub I. Pyrolytic Behavior of Polyvinyl Chloride: Kinetics, Mechanisms, Thermodynamics, and Artificial Neural Network Application // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 4359. DOI: 10.3390/polym13244359

8. Bezzaponnaya O.V. Opredelenie temperatury samovosplameneniya veshchestv i materialov metodom sinhronnogo termicheskogo analiza // Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2024. № 2 (104). S. 177–187. EDN WGCMMY. DOI: 10.25257/TTS.2024.2.104.177-187

9. Issledovanie ekspluatacionnyh harakteristik ognezashchitnyh pokrytij na osnove epoksidnyh smol, modificirovannyh astralenami / A.V. Ivanov [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2020. T. 29. № 1. S. 55–68. EDN HMLHQR. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68

10. Puti sovershenstvovaniya ognezashchitnyh termorasshiryayushchihsya sostavov dlya ispol'zovaniya na ob''ektah neftegazovogo kompleksa / O.V. Bezzaponnaya [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2017. T. 26. № 12. S. 14–24. EDN YMJWPW. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.12.14-24

11. Termicheskij analiz otdelochnyh stroitel'nyh materialov i infrakrasnaya spektroskopiya gazoobraznyh produktov ih termicheskoj destrukcii / E.V. Chernushevich [i dr.] // Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik. 2021. № 6 (40). S. 119–123. EDN WZBFYR. DOI: 10.25699/SSSB.2021.40.6.004

12. Princeva M.Yu., Bel'shina Yu.N., Umrihina M.Yu. Vliyanie klimaticheskih faktorov na harakteristiki termicheskoj destrukcii i sostav gazoobraznyh produktov razlozheniya ognezashchitnogo vspuchivayushchego pokrytiya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2026. № 1 (77). S. 112–124. EDN LXYIQY. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-112-124

13. Yang S., Wang Yu., Man P. Kinetic Analysis of Thermal Decomposition of Polyvinyl Chloride at Various Oxygen Concentrations // Fir. 2023. Vol. 6. P. 404. DOI: 10.3390/fire6100404

14. Systematic study on the combustion behavior and gaseous product emissions of typical plastics and their blends / L. Jishuo [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 202. p.B. P. 107755. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107755

15. Lopez E.C.R. Pyrolysis of Polyvinyl Chloride, Polypropylene, and Polystyrene: Current Research and Future Outlook // Eng. Proc. 2023. Vol. 56. P. 44. DOI: 10.3390/ASEC2023-15376

16. Vliyanie napolnitelej PVH-pokrytiya cellyulozosoderzhashchih tekstil'nyh materialov na effektivnost' ih ognezashchity / S.A. Syrbu [i dr.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. 2025. № 2 (416). S. 181–195 EDN TFQZUC. DOI: 10.47367/0021-3497_2025_2_181

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 11.06.2026; одобрена после рецензирования: 07.07.2026;
Принята к публикации: 24.08.2026
The information about article:
The article was submitted to the editorial office: 11.06.2026; approved after review: 07.07.2026;
Accepted for publication: 24.08.2026

Сведения об авторах:
Моторыгин Юрий Дмитриевич, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: fire-risk1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2407-5061, SPIN-код: 3913-7751
Ивахнюк Григорий Константинович, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: grigoryivahnuk@yandex, SPIN-код: 3913-7751
Бельшина Юлия Николаевна, старший научный сотрудник отдела Исследовательского центра экспертизы пожаров научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент; e-mail: belshina.y@igps.ru, https://orcid.org/0000-0002-4845-2044, SPIN-код: 2179-4907

Information about authors:
Motorygin Yuri D., professor of the department of criminalistics and engineering and technical expertise of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: fire-risk1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2407-5061, SPIN: 3913-7751
Ivakhnyuk Grigory K., professor at the department of fire safety of technological processes and productions of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: grigoryivahnuk@yandex, SPIN: 3913-7751
Belshina Yulia N., senior researcher at the research center for fire expertise at the research institute for advanced research and innovative technologies in the field of life safety of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave, 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: belshina.y@igps.ru, https://orcid.org/0000-0002-4845-2044, SPIN: 2179-4907