

Научная статья

УДК 614.841.2.001.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-112-124

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ И СОСТАВ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО ВСПУЧИВАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ

✉ Принцева Мария Юрьевна;

Бельшина Юлия Николаевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Умрихина Марина Юрьевна.

Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

✉ printseva75@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния климатических факторов (температуры, влажности) на характеристики термической деструкции и состав газообразных продуктов разложения огнезащитного вспучивающего покрытия на основе акрилового полимера. Методом синхронного термического анализа, совмещенного с инфракрасной спектроскопией газообразных продуктов разложения, установлено, что климатическое старение приводит к смещению начала активного выделения газов в сторону более низких температур. Показано, что в интервале температур около 350–450 °С у состаренного покрытия, помимо аммиака, оксида и диоксида углерода, которые выделяются и в исходном покрытии, присутствуют соединения, содержащие значительное количество ароматических и карбонильных групп, что свидетельствует об изменении химического состава и механизма разложения покрытия. В интервале 550–650 °С, как для исходного, так и для состаренного покрытия, наблюдается выделение в основном оксида и диоксида углерода, связанное с выгоранием пенококса. Полученные результаты позволяют рекомендовать метод синхронного термического анализа, совмещенного с инфракрасной спектроскопией газообразных продуктов разложения, для оценки огнезащитной эффективности покрытий и прогнозирования ее снижения в условиях эксплуатации, в том числе в рамках производства судебных пожарно-технических экспертиз.

Ключевые слова: огнезащитные вспучивающиеся покрытия, климатическое старение, климатические факторы, газообразные продукты, термодеструкция, инфракрасная спектроскопия, пожарно-техническая экспертиза

Для цитирования: 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. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-112-124

Scientific article

INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON THE CHARACTERISTICS OF THERMAL DEGRADATION AND THE COMPOSITION OF GASEOUS DECOMPOSITION PRODUCTS OF INTUMESCENT FIRE RETARDANT COATING

✉ **Printseva Maria Yu.;**

Belshina Yulia N.

Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Umrikhina Marina Yu.

Forensic expert institution of the federal fire service «Test fire laboratory» for the city of Saint-Petersburg, Saint Petersburg, Russia

✉ printseva75@mail.ru

Abstract. The results of a study of the influence of climatic factors (temperature, humidity) on the characteristics of thermal degradation and the composition of gaseous decomposition products of intumescent fire retardant coating based on an acrylic polymer are presented. By the method of synchronous thermal analysis combined with infrared spectroscopy of gaseous decomposition products, it was found that climatic aging leads to a shift in the onset of active gas release towards lower temperatures. It is shown that in the temperature range of about 350–450 °C with the aged coating, in addition to ammonia, carbon monoxide and carbon dioxide, which are released in the original coating, there are compounds containing a significant number of aromatic and carbonyl groups, which indicates a change in the chemical composition and mechanism of decomposition of the coating. In the range of 550–650 °C, for both the initial and aged coatings, the release of mainly carbon monoxide and carbon dioxide is observed, associated with the burnout of foam coke. The results obtained make it possible to recommend the method of synchronous thermal analysis combined with infrared spectroscopy of gaseous decomposition products to assess the flame-retardant effectiveness of coatings and predict its reduction under operating conditions, including in the framework of forensic fire-technical examinations.

Keywords: fireproof intumescent coatings, climatic aging, climatic factors, gaseous products, thermal destruction, infrared spectroscopy, fire-technical expertise

For citation: Printseva M.Yu., Belshina Yu.N., Umrikhina M.Yu. Influence of climatic factors on the characteristics of thermal degradation and the composition of gaseous decomposition products of intumescent fire retardant coating // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 1 (77). P. 112–124. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-112-124

Введение

Развитие современных методов огнезащиты является одной из важнейших задач обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений. Среди таких методов защиты конструкций от опасных факторов пожара особое место занимают огнезащитные вспучивающиеся (интумесцентные) покрытия (ОВП) [1–3]. В последнее время большое внимание уделяется вопросу сохранения такими покрытиями своих огнезащитных характеристик со временем. Важным фактором, влияющим на долговечность и сохранение огнезащитных свойств, является устойчивость покрытий к воздействию окружающей среды – климатическому старению [4]. Под воздействием перепадов температуры и влажности в материале могут протекать процессы, изменяющие его химический состав и структуру, что, в свою очередь, способно влиять на механизм его термического разложения, а, следовательно, и на огнезащитные свойства [5–7]. Поэтому оценка стабильности свойств ОВП после

климатического старения, в том числе для прогнозирования их изменений, представляет собой актуальную научную и практическую задачу, для решения которой требуется выбор способов, позволяющих получить информацию быстро и в достаточном объеме.

Как показывает экспертная практика, исследование ОВП металлических конструкций является одним из наиболее востребованных направлений исследований, реализуемых в судебно-экспертных учреждениях МЧС России. При изучении пассивной огнезащиты данного типа перед экспертами обычно ставятся вопросы, связанные с диагностикой, то есть установлением вида пленкообразователя и компонентов, обеспечивающих интумесцентные свойства покрытия, а также идентификацией, под которой понимается установление тождества исследуемого образца с образцом сравнения. В рамках нормативной пожарно-технической экспертизы ставятся вопросы, связанные с установлением эффективности ОВП, в рамках ответа на них проводятся испытания в соответствии с нормированными методиками. Принято считать, что наиболее объективную оценку эффективности интумесцентных покрытий обеспечивают методы испытаний в соответствии с ГОСТ Р 53295–2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа»¹, которые не могут обеспечить достаточную точность оценки динамики изменений уже нанесенных покрытий, а именно такая задача представляется одной из наиболее важных. Данное обстоятельство определяет актуальность разработки методик, основанных на применении инструментальных методов исследования физико-химических свойств покрытий, позволяющих быстро оценить сохранность их свойств под воздействием внешних факторов.

Говоря о сохранности свойств огнезащитных покрытий в первую очередь, конечно, идет разговор о свойствах эксплуатационных, определяющих их огнезащитную эффективность. Для интумесцентных покрытий она характеризуется как специфическими для данного типа покрытий свойствами, такими как способность вспучиваться при внешнем нагреве с образованием слоя пенококса, достаточного для экранирования металлической подложки, так и универсальными для всех типов покрытий, такими как адгезия покрытия к подложке, термостойкость, химстойкость и т.д. И те, и другие напрямую зависят от стабильности химического состава компонентов покрытия в процессе эксплуатации.

В настоящее время при исследовании ОВП на объекте защиты, в том числе при проведении инспекционных проверок, обычно ограничиваются изучением его визуальных характеристик и толщины, данные свойства позволяют лишь условно судить о соблюдении технологии нанесения покрытия и сохранении его эксплуатационных характеристик. Применение современных аналитических методов исследования позволяет через анализ химического состава и изучение динамики его изменения под влиянием различных внешних факторов делать выводы в реальном времени о сохранении эффективности пассивной огнезащиты данного типа на основе объективных данных.

Среди аналитических методов исследования выбор необходимо осуществлять по сочетанию таких характеристик, как криминалистическая значимость получаемой информации, трудозатраты на его реализацию и стоимость. В этой связи наибольший интерес могут представлять комплексные методики, сочетающие несколько аналитических методов и позволяющие при реализации единичного анализа получать массив данных. К таким методикам относится исследование органических материалов с помощью синхронного термического анализа (СТА), сочетающего термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию, совмещенного с инфракрасной спектроскопией (ИКС), позволяющего проводить детальный анализ газообразных продуктов, образующихся в ходе термического разложения образца.

¹ ГОСТ Р 53295–2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

Целью работы являлось изучение изменения характеристик термической деструкции и состава газообразных продуктов, выделяющихся в процессе разложения огнезащитного вспучивающего покрытия на акриловой основе под действием климатического старения.

Методы исследования

В настоящее время акриловые пленкообразователи являются одними из наиболее распространенных, благодаря возможности широкого варьирования химического состава исходного полимера за счет сополимеризации. Лакокрасочные материалы на их основе могут быть как органо-, так и водорастворимыми, а сформировавшиеся покрытия обладать широким диапазоном варьирования характеристик в зависимости от требований и условий последующей эксплуатации. В работе в качестве объекта исследования было рассмотрено органорастворимое покрытие на основе акрилового связующего. Испытания по определению стойкости образца к воздействию переменной температуры и повышенной влажности проводились в соответствии с ГОСТ 9.401–2018 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов»² по методу 12 в климатической камере ПЛКА TV-1000V. Исследование состава газообразных продуктов термической деструкции ОВП проводилось при совместном использовании метода термического анализа и инфракрасной спектроскопией. Анализ газообразных продуктов термодеструкции совмещенным ТГ/ИК способом исследования проводился для изучения характеристик пиролиза и механизма реакции пиролиза вспучивающихся покрытий [8–13]. 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 от 30 до 900 °С. Образующиеся при деструкции газообразные вещества 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 °С транспортную газовую линию с целью предотвращения конденсации летучих газов, образующихся в процессе пиролиза. На основе термического и ИК-спектрального анализа были исследованы основные стадии процесса пиролиза ОВП, а также определены выделяющиеся газы на каждой стадии.

Результаты исследования и их обсуждение

Профиль выделяемого газа, рассчитанный с применением ортогонализации Грамма-Шмидта по результатам ИКС, совмещенной с СТА по ГОСТ Р 57988–2017 «Композиты полимерные. Термогравиметрический анализ, совмещенный с анализом методом инфракрасной спектроскопии (ТГА/ИК)»³, является показателем динамики образования газообразных продуктов на каждом этапе разложения. Полученный результат такого расчета для исходного акрилового ОВП (рис. 1) демонстрирует активное образование газообразных продуктов разложения в двух интервалах температур: от 200 °С до 450 °С и от 550 °С до 650 °С. Полученные результаты согласуются с данными термогравиметрического анализа, в соответствии с которыми резкая потеря массы образца происходит в этих же температурных интервалах (рис. 2).

² ГОСТ 9.401–2018. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. М.: Стандартинформ, 2018. 118 с.

³ ГОСТ Р 57988–2017. Композиты полимерные. Термогравиметрический анализ, совмещенный с анализом методом инфракрасной спектроскопии (ТГА/ИК). М.: Стандартинформ, 2017. 19 с.

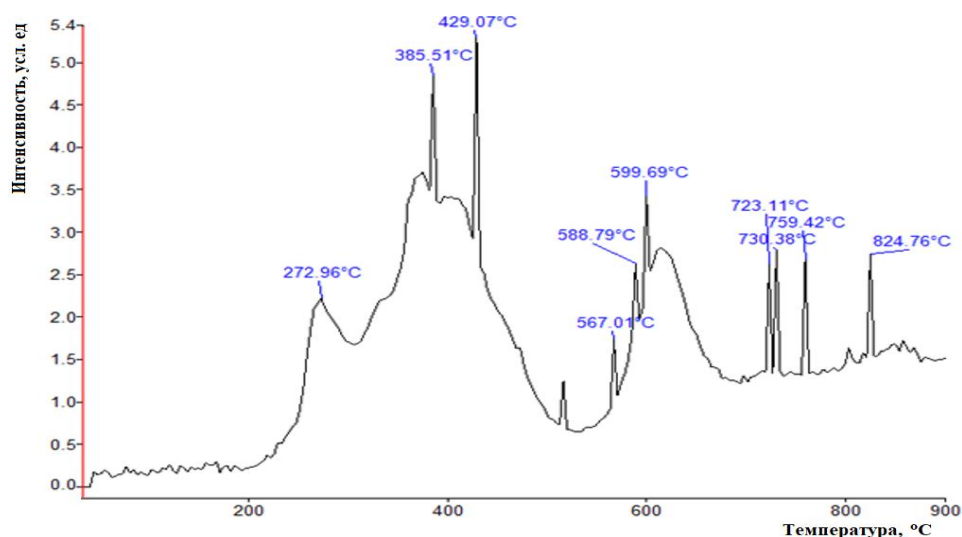


Рис. 1. Профиль выделяемого газа при термодеструкции исходного ОВП на акриловой основе (диаграмма Грама-Шмидта)

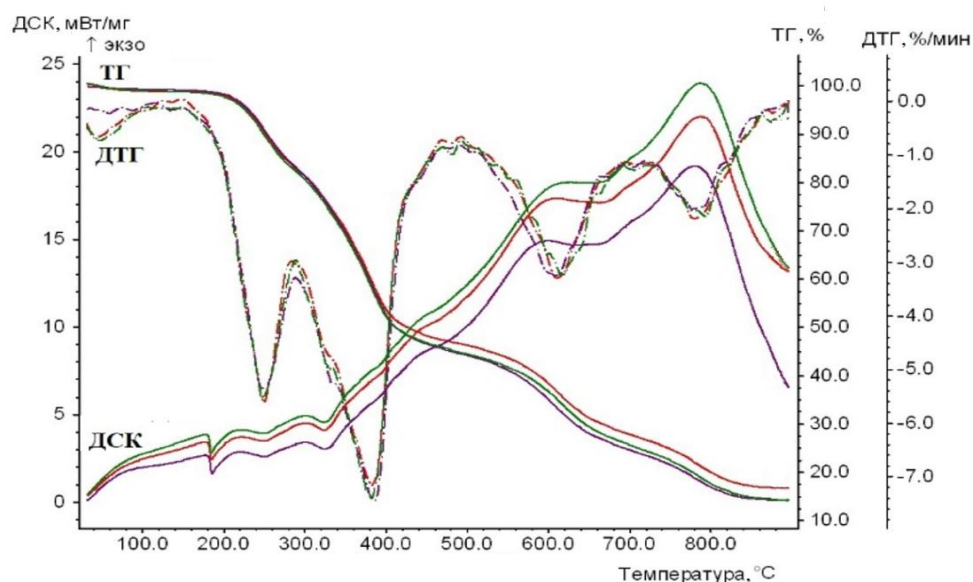


Рис. 2. Термоаналитические кривые, полученные при исследовании методом СТА трех параллельных проб исходного ОВП на акриловой основе

В первом из указанных интервалов на профиле выделяемого газа наблюдается две области, характеризующиеся постепенным ростом и снижением количества выделяющихся газообразных продуктов разложения. Первая имеет основной максимум при 273 °С и соответствует началу деструкции покрытия, а вторая характеризуется резким увеличением выхода газообразных продуктов при температурах 386 °С, 429 °С, проявляющееся в виде острых узких пиков на фоне широкой области образования газообразных продуктов деструкции (рис. 1). Во втором диапазоне температур, характеризующимся активным ростом количества образующихся газообразных продуктов деструкции, на профиле выделяемого газа фиксируется набор острых пиков с максимальным образованием газообразных продуктов при 567, 589 и 599 °С.

Для значений температур, при достижении которых на полученном профиле наблюдалось интенсивное выделение газов (273 °С, 386 °С, 429 °С, 599 °С), были проанализированы ИК-спектры образующихся продуктов разложения покрытия (рис. 3–6).

Как видно из рис. 3, при нагреве до 273 °С на ИК-спектре в основном фиксируются характеристические полосы поглощения аммиака NH_3 , такие как $\sim 3\,300\text{ см}^{-1}$, связанная с валентными колебаниями связи N-H и полоса в диапазоне $950\text{--}970\text{ см}^{-1}$, связанная с деформационными колебаниями (ее раздвоение на спектре связано с проявлением вращательных переходов, что характерно для спектров газов). Значительное количество выделяющегося на этой стадии аммиака свидетельствует о разложении азотсодержащих компонентов (например, фосфата аммония), обеспечивающих огнезащитные характеристики ОВП. Также фиксируются признаки наличия алифатических метильных и метиленовых групп, что говорит об образовании содержащих их газов, возможно углеводородов (от C1 до C4). Они проявляются в виде полос поглощения в области $2\,850\text{--}3\,000\text{ см}^{-1}$, связанной с валентными колебаниями связи C-H, и в области $1\,380\text{--}1\,460\text{ см}^{-1}$, в которой проявляются полосы поглощения, связанные с деформационными колебаниями $-\text{CH}_3$ и $-\text{CH}_2$ групп.

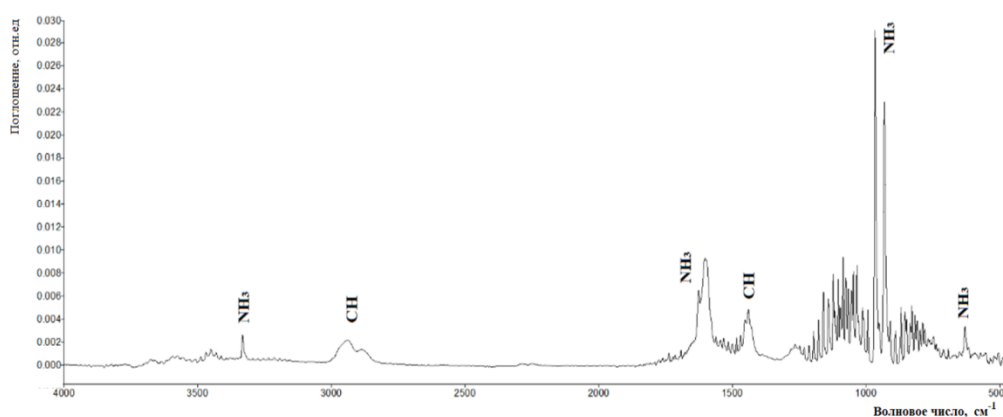


Рис. 3. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе при температуре 273 °С

На ИК-спектре газообразных продуктов разложения, образующихся при температуре 386 °С (рис. 4), также фиксируется аммиак, кроме того, появляются характеристические полосы поглощения угарного CO ($2\,143\text{ см}^{-1}$) и углекислого газа CO_2 ($2\,349$ и 668 см^{-1}). Также на спектре присутствуют малоинтенсивные полосы поглощения, относящиеся к связям C-H. При температуре 424 °С (рис. 5) из образца ОВП на акриловой основе продолжает выделяться аммиак, но значительно в меньшей степени, при этом существенно возрастает относительное содержание углекислого газа. Полос поглощения, относящихся к связям C-H, не наблюдается. При температуре 599 °С (рис. 6) газообразные продукты разложения образца ОВП представляют собой только оксиды углерода (CO и CO_2).

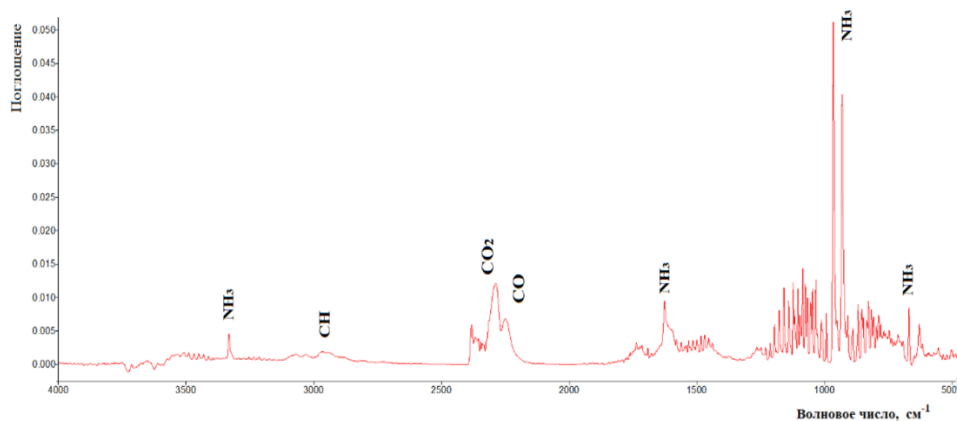


Рис. 4. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе при температуре 386 °С

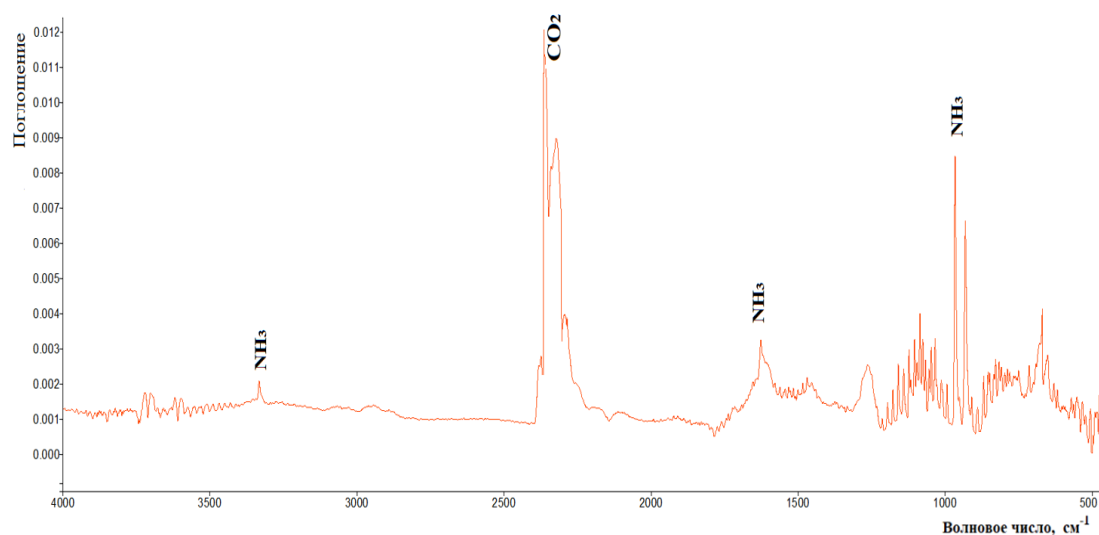


Рис. 5. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе при температуре 424 °С

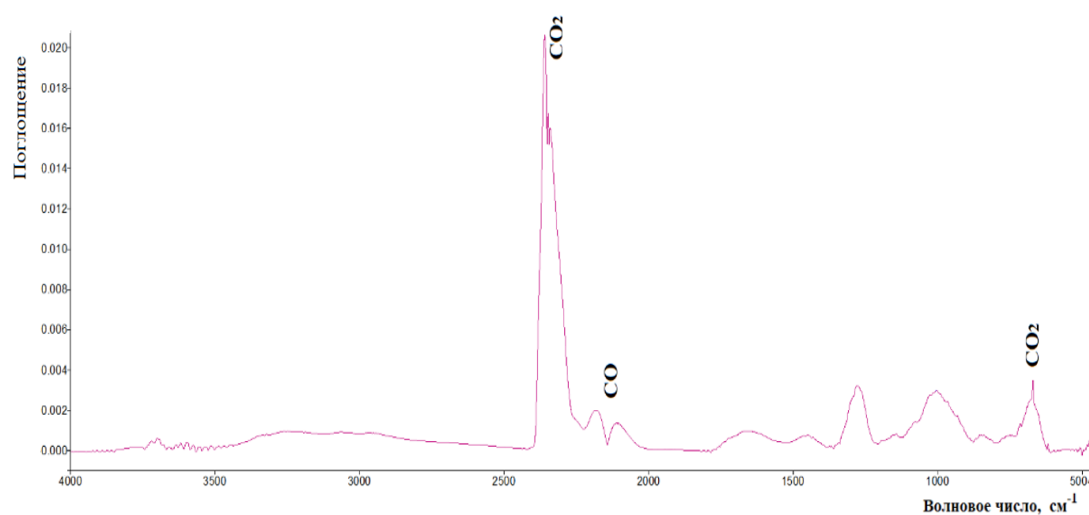


Рис. 6. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе при температуре 599 °С

Профиль выделяющихся газов для образца ОВП, рассмотренного в работе, после климатического старения также характеризуется двумя температурными интервалами, в рамках которых наблюдается наиболее активное образование газообразных продуктов разложения: от 200 °С до 450 °С и от 550 °С до 650 °С. В первом интервале наблюдаются резкие максимумы при нагреве до 207 °С, 276 °С, 370 °С, 403 °С, во втором – при температуре 649 °С. Полученные данные схожи с результатами исследования исходного ОВП (рис. 7) и согласуются с данными термического анализа (рис. 8). При этом наблюдается появление на профиле выделяющихся газов пика при 207 °С, которые до климатического старения образца не проявлялся.

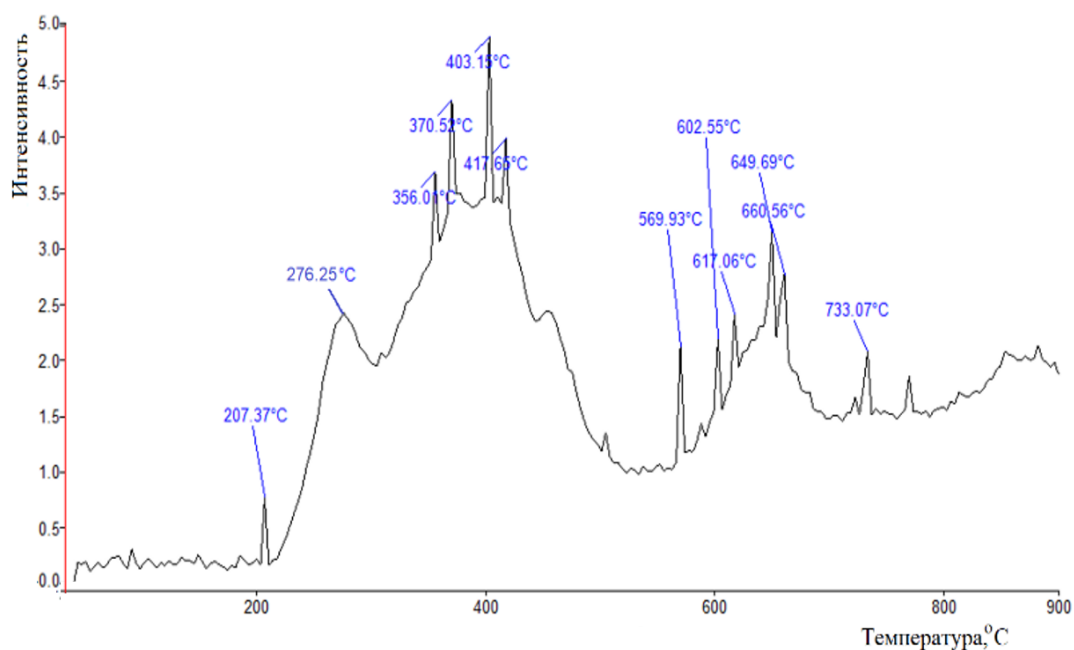


Рис. 7. Профиль выделяемого газа при термодеструкции ОВП на акриловой основе после климатического старения (диаграмма Грама-Шмидта)

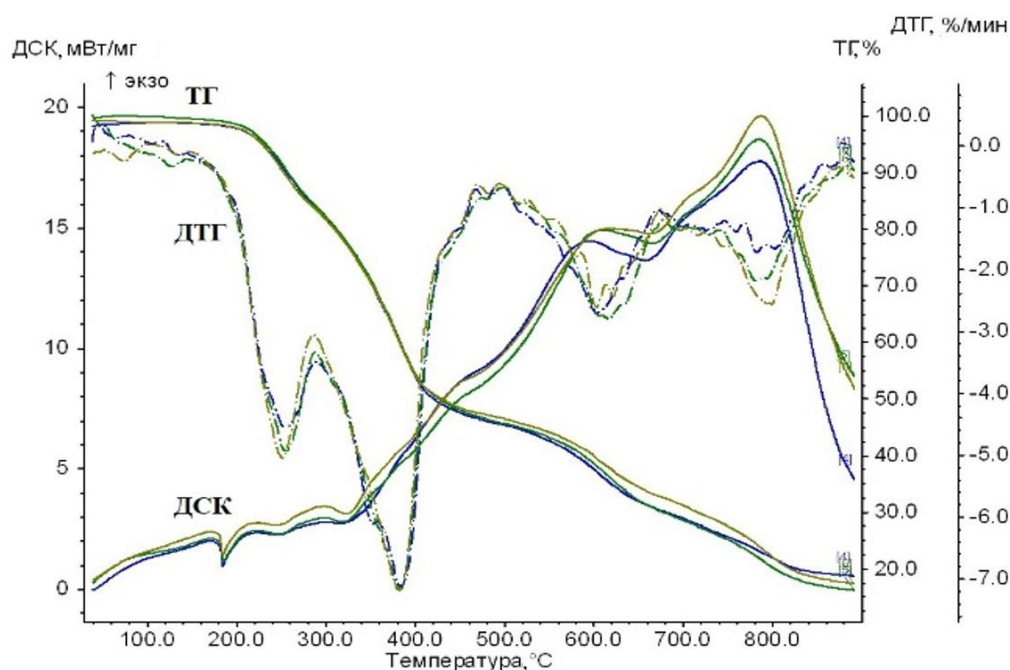


Рис. 8. Термоаналитические кривые ОВП на акриловой основе после климатического старения

ИК-спектры газов, выделяющихся из искусственно состаренных образцов ОВП при значениях температур 207 °С, 276 °С, 370 °С, 403 °С и 649 °С, которые соответствуют наиболее активному выделению газообразных продуктов пиролиза, представлены на рис. 9–13.

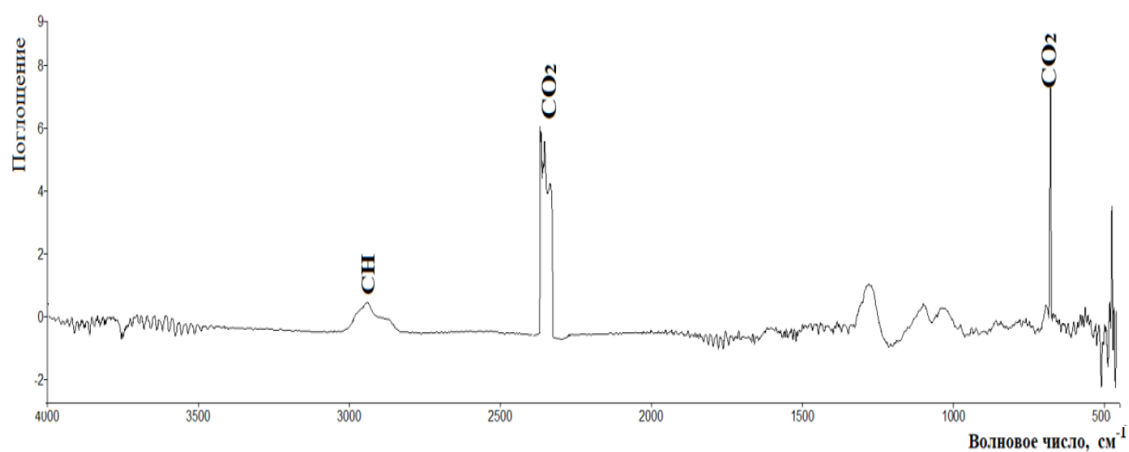


Рис. 9. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе после климатического старения при температуре 207 °С

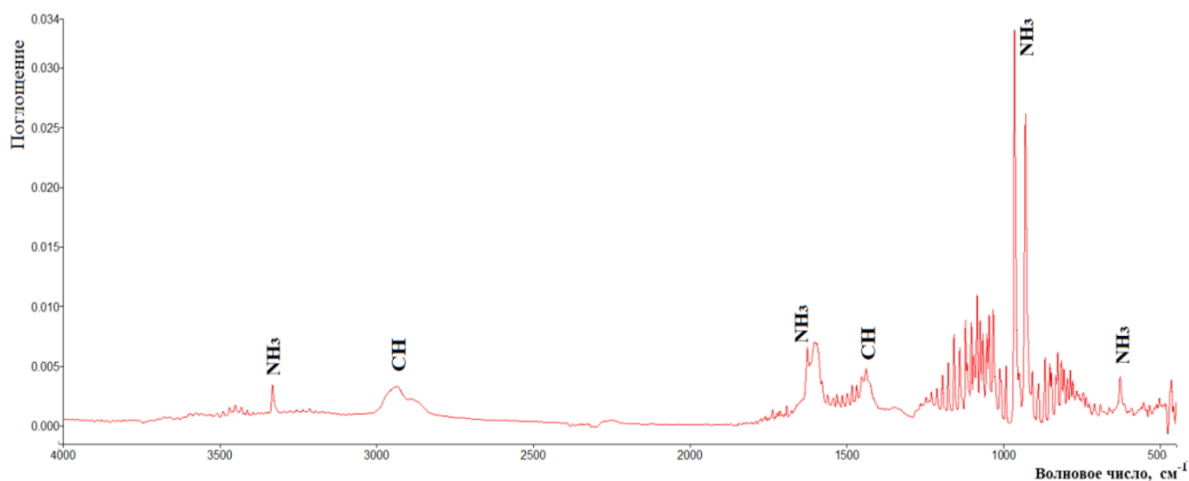


Рис. 10. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе после климатического старения при температуре 276 °С

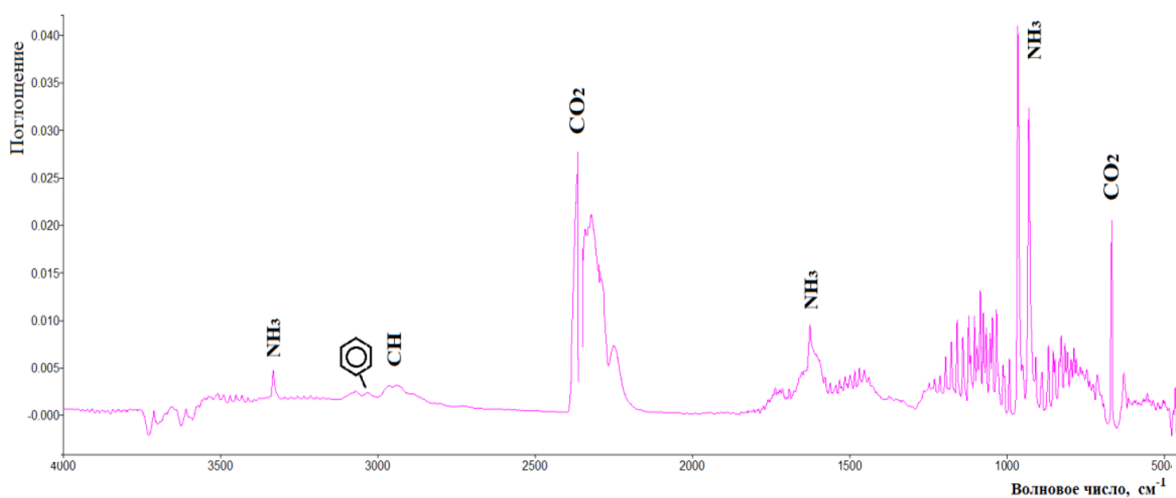


Рис. 11. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе после климатического старения при температуре 370 °С

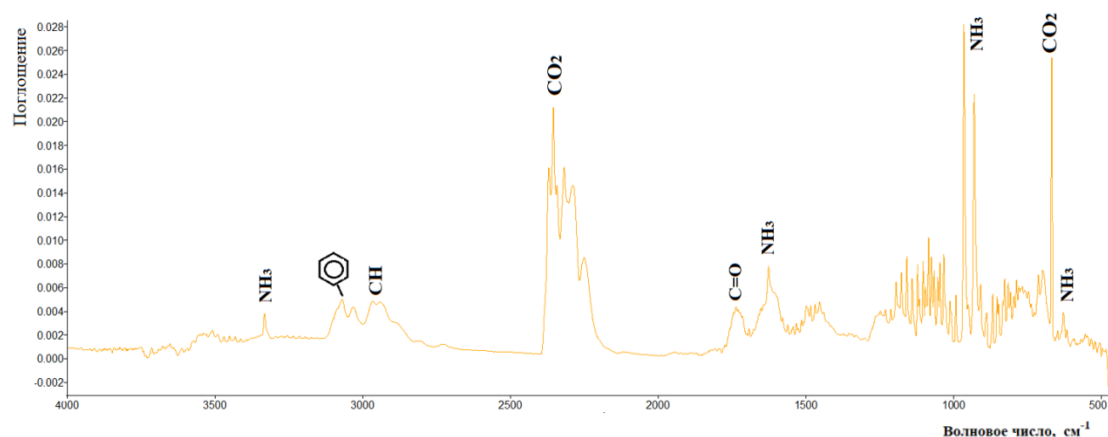


Рис. 12. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе после климатического старения при температуре 403 °С

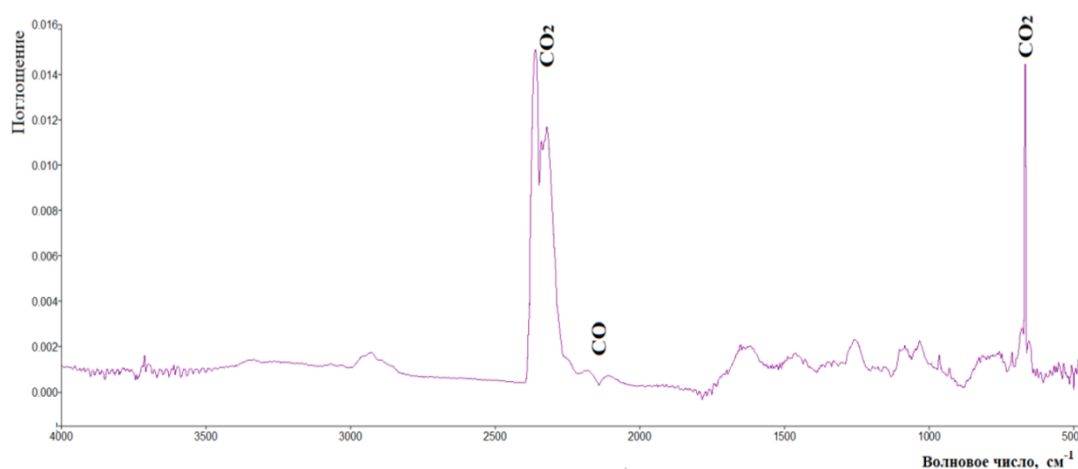


Рис. 13. ИК-спектр газообразных продуктов термоокислительной деструкции образца ОВП на акриловой основе после климатического старения при температуре 649 °С

На ИК-спектре продуктов разложения, образующихся при температуре 207 °С, присутствуют полосы поглощения, относящиеся к связям алифатических углеводородным группам, а также к углекислому газу. При данном значении температуры нагрева на спектре отсутствуют признаки присутствия аммиака. Наблюдающаяся картина свидетельствует об образовании в ходе климатического старения новых менее термостойких соединений, в результате процессов, протекающих в составе органических компонентов, вероятно, пленкообразователе или пластификаторе.

При температуре 276 °С помимо полос поглощения, относящихся к связям С-Н, появляются полосы поглощения аммиака (NH_3), который образуется в результате разложения азотсодержащих огнезащитных компонентов (рис. 10).

При температуре 370 °С на спектре наблюдаются характеристические полосы поглощения аммиака, углекислого газа, а также полосы поглощения, связанные с валентными колебаниями связи С-Н в области $3\,000\text{--}2\,700\text{ см}^{-1}$ и бензольного кольца в области $3\,080\text{--}3\,030\text{ см}^{-1}$ (рис. 11), что говорит о выделении ароматических соединений. При температуре 403 °С на спектре появляются характеристические полосы поглощения карбонильной группы С=О, что говорит об активном разложении с образованием окисленных структур компонентов покрытия (рис. 12). При 649 °С в образце происходит выделение только углекислого и угарного газа, связанное с процессом выгорания пенококса (рис. 13).

Проведенное исследование позволило установить, что при нагревании огнезащитного вспучивающегося покрытия на акриловой основе в интервале температур от 250 °С до 450 °С происходит разложение связующего и огнезащитных компонентов с выделением аммиака, оксида и диоксида углерода, а также соединений, содержащих С-Н группы. После климатического старения ОВП на акриловой основе термическая деструкция ОВП начинается раньше почти на 70 °С, при этом в интервале температур от 350 °С до 450 °С меняется состав газовой фазы. Помимо указанных выше газов происходит выделение соединений, содержащих ароматические и карбонильные группы. Полученные результаты свидетельствуют об изменении молекулярного состава компонентов покрытий в результате климатического старения, анализ подобных изменений позволяет судить о глубине протекающих в материале процессов и, при наличии корреляции между химическим составом и огнезащитными свойствами покрытий, делать вывод о сохранении ими своих эксплуатационных характеристик. В интервале температур от 550 °С до 650 °С как в исходном, так и в подвергнутом климатическому старению образце происходит активное выделение оксидов углерода, связанное с процессом выгорания пенококса, соответственно изучение газообразных продуктов горения на данной стадии разложения не позволяет судить об изменении молекулярного состава компонентов покрытия под воздействием климатических факторов.

Заключение

Таким образом, на примере анализа газообразных продуктов, выделяющихся при термодеструкции огнезащитного покрытия на акриловой основе, методом термического анализа совмещенного с инфракрасной спектроскопией показано, что климатическое старение снижает его термическую стабильность и приводит к изменению химического состава продуктов разложения на основных стадиях деструкции. Полученные данные важны для прогнозирования долговечности и сохранения функциональных свойств огнезащитных материалов в условиях эксплуатации. Результаты исследования имеют практическую значимость для оценки состояния огнезащитных покрытий после длительного срока службы, проводимой, в том числе, в рамках производства судебной пожарно-технической экспертизы.

Список источников

1. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review // *Journal of Fire Sciences*. 2016. Vol. 34 (2). P. 120–163. DOI: 10.1177/0734904115626720
2. Павлович А.В., Дринберг А.С., Машляковский Л.Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. М.: ООО Издательство «ЛКМ-пресс». 2018. 488 с.
3. Oliveira R.B., Moreno Junior A.L., Vieira L.C. Intumescent paint as fire protection coating // *Ibracon*. 2017. Vol. 10. № 1. P. 220–243. DOI: 10.1590/S1983-41952017000100010
4. Grigonis M., Malaiskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // *Fire Safety Journal*. 2018. № 98. Vol. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007
5. Принцева М.Ю., Клаптюк И.В., Теплякова Т.Д. Исследование процессов деструкции интумесцентных огнезащитных покрытий в результате воздействия климатических факторов // *Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXVI Междунар. науч.-практ. конф. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. 2024. 986 с. С. 503–510.*
6. Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии / М.Ю. Умрихина [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2020. Т. 29. № 5. С. 60–70. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-25-31
7. Еремина Т.Ю., Уткин. С.В. Исследование изменений свойств огнезащитных покрытий интумесцентного типа методом термомеханического анализа // *Пожаровзрывобезопасность*, 2024. Т. 33. № 2. С. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41
8. Pyrolysis characteristics and reaction mechanism of intumescent fire-retardant coating with thermogravimetry/Fourier transform infrared analysis / J. Gonghua [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024. Vol. 177. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03119

9. Thermal degradation study of intumescent flame retardants by TG and FTIR: Melamine phosphate and its mixture with pentaerythritol Author links open overlay panel / W. Zhengzhou [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009. Vol. 86. P. 207–214. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.06.007

10. Pyrolysis characteristics and reaction mechanism of intumescent fire-retardant coating with thermogravimetry/Fourier transform infrared analysis / J. Gonghua [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024. Vol. 177. 106306. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106306

11. Study on pyrolysis characteristics, kinetics and flame-retardant mechanism of ultra-thin intumescent fire-retardant coating for steel structures by thermogravimetric analysis and shuffled complex evolution / Zh. Jiaqing [et al.] // *Polymer Bulletin*. 2023. Vol. 81. P. 7963–7978. DOI: 10.1007/s00289-023-05074-z

12. Ding Pyrolysis Characteristics and Reaction Mechanism of Thin Intumescent Fire-Retardant Coating for Steel Structures by Thermogravimetry/Fourier Transform Infrared Spectrometry / Zh. Jiaqing [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. DOI: 10.1007/s11665-025-11473-2

13. Thermal degradation study of intumescent flame retardants by TG and FTIR: Melamine phosphate and its mixture with pentaerythritol Author links open overlay panel / W. Zhengzhou [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009. Vol. 86. P. 207–214. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.06.007

References

1. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review // *Journal of Fire Sciences*. 2016. Vol. 34 (2). P. 120–163. DOI: 10.1177/0734904115626720

2. Pavlovich A.V., Drinberg A.S., Mashlyakovskij L.N. *Ognezashchitnye vspuchivayushchiesya lakokrasochnye pokrytiya*. M.: OOO Izdatel'stvo «LKM-press». 2018. 488 s.

3. Oliveira R.B., Moreno Junior A.L., Vieira L.C. Intumescent paint as fire protection coating // *Ibracon*. 2017. Vol. 10. № 1. P. 220–243. DOI: 10.1590/S1983-41952017000100010

4. Grigonis M., Malaiskiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // *Fire Safety Journal*. 2018. № 98. Vol. 15–23. DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.03.007

5. Princeva M.Yu., Klapyuk I.V., Teplyakova T.D. Issledovanie processov destrukcii intumescentnyh ognezashchitnyh pokrytij v rezul'tate vozdejstviya klimaticheskikh faktorov // *Aktual'nye problemy pozharnoj bezopasnosti: materialy XXXVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. M.: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut protivopozharnoj oborony MCHS Rossii*. 2024. 986 s. S. 503–510.

6. Issledovanie starenija ognezashchitnyh vspuchivayushchihsya pokrytij metodami SEM, XRD i IK-spektroskopii / M.Yu. Umrihina [i dr.] // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2020. T. 29. № 5. S. 60–70. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-3-25-31

7. Eremina T.Yu., Utkin. S.V. Issledovanie izmenenij svojstv ognezashchitnyh pokrytij intumescentnogo tipa metodom termomekhanicheskogo analiza // *Pozharovzryvobezopasnost'*, 2024. T. 33. № 2. S. 32–41. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.32-41

8. Pyrolysis characteristics and reaction mechanism of intumescent fire-retardant coating with thermogravimetry/Fourier transform infrared analysis / J. Gonghua [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024. Vol. 177. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03119

9. Thermal degradation study of intumescent flame retardants by TG and FTIR: Melamine phosphate and its mixture with pentaerythritol Author links open overlay panel / W. Zhengzhou [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009. Vol. 86. P. 207–214. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.06.007

10. Pyrolysis characteristics and reaction mechanism of intumescent fire-retardant coating with thermogravimetry/Fourier transform infrared analysis / J. Gonghua [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024. Vol. 177. 106306. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106306

11. Study on pyrolysis characteristics, kinetics and flame-retardant mechanism of ultra-thin intumescent fire-retardant coating for steel structures by thermogravimetric analysis and shuffled complex evolution / Zh. Jiaqing [et al.] // *Polymer Bulletin*. 2023. Vol. 81. P. 7963–7978. DOI: 10.1007/s00289-023-05074-z

12. Ding Pyrolysis Characteristics and Reaction Mechanism of Thin Intumescent Fire-Retardant Coating for Steel Structures by Thermogravimetry/Fourier Transform Infrared Spectrometry / Zh. Jiaqing [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. 2025. DOI:10.1007/s11665-025-11473-2

13. Thermal degradation study of intumescent flame retardants by TG and FTIR: Melamine phosphate and its mixture with pentaerythritol Author links open overlay panel / W. Zhengzhou [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2009. Vol. 86. P. 207–214. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.06.007

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 28.10.2025; одобрена после рецензирования: 20.11.2025; принята к публикации: 19.01.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 28.10.2025; approved after review: 20.11.2025; accepted for publication: 19.01.2026

Сведения об авторах:

Принцева Мария Юрьевна, ведущий 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: printseva75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1925-2334>, SPIN-код: 8517-0475

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

Умрихина Марина Юрьевна, старший инженер Судебно-экспертного учреждения Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по городу Санкт-Петербургу (197046, Санкт-Петербург, ул. Пеньковская, д. 6), e-mail: marina-719@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4657-2894>

Information about the authors:

Printseva Maria Yu., leading researcher of the research center for fire expertise of 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: printseva75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1925-2334>, SPIN: 8517-0475

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

Umrikhina Marina Yu., senior engineer at the forensic institution of the Federal fire service «Test Fire Laboratory» in Saint-Petersburg (197046, Saint-Petersburg, Penkovaya st., 6), e-mail: marina-719@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4657-2894>