

УДК 614.841.45

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-11-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-11-19)**М.А. КОМАРОВА¹, И.И. ВЕДЯКОВ¹, М.В. ШАЛАБИН^{1,✉}, И.А. ВЛАСКИН^{1,2}**

¹Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, д. 9, стр. 1, г. Москва, 125047, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДАМИ ИК–СПЕКТРОМЕТРИИ

Аннотация

Введение. Долговечность и сохранение огнезащитных свойств тонкослойных вспучивающихся покрытий в значительной степени определяются стойкостью их химического состава к атмосферным воздействиям, в первую очередь к влаге. Прямые натурные наблюдения за процессами деструкции требуют длительного времени, что делает актуальным применение инструментальных аналитических методов, таких как инфракрасная спектроскопия, для оперативной диагностики состояния и выявления механизмов деградации. В статье рассмотрены особенности применения ИК-Фурье спектроскопии для сравнительного анализа химического состояния огнезащитного покрытия после эксплуатации в различных климатических условиях.

Цель. Проведение сравнительной идентификации функциональных групп и оценка степени химической деструкции огнезащитного покрытия на эпоксино-акрилатном связующем после длительного (в течение 2 лет) воздействия атмосферной влаги при эксплуатации в открытой промышленной атмосфере холодного климата (открытый контур) по сравнению с условиями защищенной эксплуатации (закрытый контур).

Материалы и методы. В работе проведен анализ образцов огнезащитного покрытия, отобранных с объектов эксплуатации. Инфракрасные спектры поглощения снимали на Фурье-спектрометре в диапазоне 4000–400 см⁻¹ в форме таблеток с KBr в соответствии с ГОСТ Р 57941-2017. Качественная интерпретация спектров проведена на основе анализа характеристических полос поглощения функциональных групп полимерной матрицы, фосфорорганического антипирена и минерального наполнителя.

Результаты. Методом ИК-спектроскопии установлены значительные различия в химическом состоянии образцов. У образца из открытого контура зафиксировано практически полное исчезновение полос в области 1240–980 см⁻¹, характерных для валентных колебаний связей P=O и P–O–P полифосфатного антипирена, что свидетельствует о его глубоком гидролитическом разрушении и вымывании. Одновременно наблюдается существенное усиление широкой полосы связанных OH-групп (3600–3200 см⁻¹) и ослабление сигнатур эпоксидной матрицы. В образце из закрытого контура ключевые полосы антипирена и полимера сохраняются, однако наличие полосы OH-группы указывает на начальные стадии гидролиза.

Выводы. Установлено, что доминирующим механизмом деградации огнезащитного покрытия является гидролитическое разрушение, интенсивность которого напрямую зависит от уровня влажностной нагрузки. Результаты подтверждают высокую чувствительность фосфорорганического антипирена и полимерной матрицы огнезащитного покрытия на эпоксино-акрилатном связующем к длительному воздействию влаги.

Ключевые слова: огнезащитное покрытие, атмосферная деструкция, инфракрасная спектроскопия, ИК-Фурье спектр, гидролиз, полифосфатный антипирен, эпоксидная матрица, водопоглощение, долговечность

Для цитирования: Комарова М.А., Ведяков И.И., Шалабин М.В., Власкин И.А. Исследование процессов атмосферной деструкции огнезащитного покрытия методами ИК-спектроскопии // *Бетон и железобетон*. 2026. № 1 (632). С. 11–19. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-11-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-11-19). EDN: QDBCKX.

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ООО «ПСМК».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.12.2025

Поступила после рецензирования 09.02.2026

Принята к публикации 12.02.2026

M.A. KOMAROVA¹, I.I. VEDYAKOV¹, M.V. SHALABIN^{1,✉}, I.A. VLASKIN^{1,2}

¹ Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

² Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya Square, 9, bld. 1, Moscow, 125047, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF ATMOSPHERIC DESTRUCTION OF FLAME–RETARDANT COATING BY IR SPECTROMETRY METHODS

Abstract

Introduction. The durability and retention of fire-retardant properties of thin-film intumescent coatings are largely determined by the resistance of their chemical composition to atmospheric influences, primarily moisture. Direct in-situ observations of degradation processes require extensive time, making the use of instrumental analytical methods, such as infrared spectroscopy, essential for rapid diagnostics and identification of degradation mechanisms. This article discusses the application of Fourier-transform IR spectroscopy for comparative analysis of the chemical state of fire-retardant coatings after operation in various climatic conditions.

Aim. To conduct a comparative identification of functional groups and assess the degree of chemical degradation of an epoxy-acrylate-based fire-retardant coating after prolonged (2 years) exposure to atmospheric moisture during operation in an open industrial atmosphere in a cold climate (open circuit) compared to protected operating conditions (closed circuit).

Materials and methods. This study analyzed fire-retardant coating samples collected from operational sites. Infrared absorption spectra were recorded on a Fourier spectrometer in the range of 4000–400 cm⁻¹ using KBr pellets in accordance with State Standard R 57941-2017. Qualitative interpretation of the spectra was based on an analysis of the characteristic absorption bands of the functional groups of the polymer matrix, organophosphorus flame retardant, and mineral filler.

Results. IR spectroscopy revealed significant differences

in the chemical state of the samples. The open-loop sample showed the almost complete disappearance of bands in the range of 1240–980 cm⁻¹, characteristic of the stretching vibrations of the P=O and P–O–P bonds of the polyphosphate flame retardant, indicating its profound hydrolytic degradation and leaching. Concurrently, a significant strengthening of the broad band of bound OH groups (3600–3200 cm⁻¹) and a weakening of the epoxy matrix signatures were observed. In the closed-loop sample, the key bands of the flame retardant and polymer are preserved, but the presence of the OH band indicates the initial stages of hydrolysis.

Conclusions. It was established that the dominant degradation mechanism of the fire-retardant coating is hydrolytic degradation, the intensity of which directly depends on the level of moisture load. The results confirm the high sensitivity of the organophosphorus flame retardant and the polymer matrix of the epoxy-acrylate-based fire-retardant coating to long-term exposure to moisture.

Keywords: fire-retardant coating, atmospheric degradation, infrared spectroscopy, FTIR spectrum, hydrolysis, polyphosphate flame retardant, epoxy matrix, water absorption, durability

For citation: Komarova M.A., Vedyakov I.I., Shalabin M.V., Vlaskin I.A. Investigation of the processes of atmospheric destruction of flame-retardant coating by IR spectrometry methods. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2026, no. 1 (632), pp. 11–19. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1\(632\)-11-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-1(632)-11-19). EDN: QDBCKX.

Authors contribution statement

All the authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Funding

The study was carried out within the framework of contractual work between JSC Research Center of Construction and PSMK LLC.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.12.2025

Revised 09.02.2026

Accepted 12.02.2026

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Печатное и сетевое рецензируемое научно-техническое издание, в котором публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований по строительным материалам, конструкциям, сооружениям, основаниям и фундаментам при статических и динамических воздействиях.

«Вестник НИЦ «Строительство» (Print) включен в Перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки).

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Журнал индексируется в академических базах данных и информационных системах: ROAD, CrossRef, Академия Google. Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

Тираж печатного издания – 500 экземпляров.

Подробная информация на сайте vestnik.cstroy.ru

Подписной индекс ООО «Урал Пресс» – 36569.



Приглашаем к сотрудничеству ученых, аспирантов, исследователей!

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская ул., дом 6, корпус 1, кабинет 400/2
Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023
Выпускающий редактор – Починина Наталья
e-mail: pochininane@cstroy.ru

Введение

В настоящее время для обеспечения требуемых пределов огнестойкости металлических строительных конструкций широко применяются тонкослойные вспучивающиеся огнезащитные покрытия (ТВОП). Их эффективность основана на способности под воздействием высокой температуры формировать многократно увеличивающийся в объеме пористый коксовый слой, обладающий высокими теплоизолирующими свойствами. Ключевым условием долговечности таких систем является сохранение исходного химического состава и структурной целостности покрытия на протяжении всего срока службы в условиях разнообразных эксплуатационных воздействий.

Наибольшее деструктивное влияние на органические композиции, к классу которых относятся многие современные ТВОП, оказывает атмосферная влага. Проникая в материал, вода может инициировать процессы гидролиза как полимерного связующего, так и функциональных огнезащитных добавок, в частности фосфорорганических соединений [1]. Это приводит к пластификации материала, снижению его адгезионной и когезионной прочностей, а главное – к необратимой потере огнезащитной эффективности вследствие деградации или вымывания активных компонентов. Поэтому объективная оценка состояния покрытия после определенного периода эксплуатации и прогнозирование его остаточного ресурса являются критически важными задачами для обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений.

Натурный мониторинг долговечности покрытий, связанный с длительными сроками наблюдений, зачастую затруднен. В этой связи актуальным является применение инструментальных физико-химических методов анализа, позволяющих проводить экспресс-диагностику и выявлять ранние признаки деструкции. Одним из наиболее информативных неразрушающих методов, пригодных для идентификации функциональных групп и качественной оценки химических превращений в материале, является инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИК-Фурье спектроскопия). Данный метод, регламентированный для полимерных композитов в ГОСТ Р 57941-2017 [2], предоставляет уникальную возможность получения «спектрального отпечатка» материала и отслеживания изменений в его молекулярной структуре.

В работах [3, 4] описаны проведенные исследования эффективности вспучивающихся тонкослойных огнезащитных покрытий в процессе ускоренных климатических испытаний. Однако применение ИК-спектроскопии для диагностики химической деструкции таких материалов после реальной (натурной) длительной эксплуатации в литературе освещено недостаточно.

Настоящая работа посвящена исследованию степени химической сохранности и механизмов атмосферной деструкции тонкослойного вспучивающегося огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связую-

щем после эксплуатации в течение 2 лет в условиях закрытого и открытого контуров на промышленном объекте г. Норильска.

Объектом исследования являются натурные образцы огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем, отобранные с эксплуатируемого объекта. Покрытие представляет собой модифицированную органико-минеральную композицию. Для анализа использовались два образца покрытия, снятые со стальных конструкций:

Образец № 1 отобран с закрытого контура (категория УХЛ3 по ГОСТ 15150-69 [5]), где воздействие атмосферной влаги было ограниченным.

Образец № 2 отобран с открытого контура (категория УХЛ1 по ГОСТ 15150-69 [5]), подвергался длительному прямому воздействию атмосферной влаги, температурным перепадам и другим атмосферным факторам.

Материалы и методы

Исследование выполнено методом ИК-Фурье спектроскопии с качественной интерпретацией полученных спектров.

Для получения инфракрасных спектров и последующего качественного анализа образцы покрытий высушивали при температуре (40 ± 5) °С до постоянной массы, после чего измельчали в агатовой ступке до состояния мелкодисперсного порошка. Порошкообразный образец (~1–2 мг) тщательно смешивали с бромидом калия (KBr, марка «спектроскопическая чистота», ~200 мг) и прессовали в таблетку диаметром 13 мм под давлением 10 т/см².

ИК-Фурье спектры поглощения регистрировали в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57941-2017 [2]. Спектры снимали на Фурье-спектрометре Perseus STA 449 F5 Jupiter, представленном на рис. 1. Измерения проводили в диапазоне волновых чисел 4000–400 см⁻¹. Число накоплений сканов – 32; оптическое разрешение – 4,0 см⁻¹. В качестве фона использовали спектр чистой таблетки KBr.

Качественную интерпретацию полученных спектров проводили на основе анализа положения, интенсивности и формы характеристических полос поглощения (пиков).

Идентификацию функциональных групп выполняли путем сопоставления экспериментальных данных с литературными спектрально-структурными корреляциями для полимерных материалов [6], фосфорорганических соединений [7] и минеральных наполнителей [8]. Особое внимание уделяли спектральным областям, отвечающим за ключевые компоненты покрытия:

– Область 3700–3200 см⁻¹: валентные колебания O–H и N–H связей (адсорбированная влага, гидроксильные и аминные группы).

– Область 1800–1500 см⁻¹: валентные колебания C=O карбонильных групп и деформационные колебания N–H.

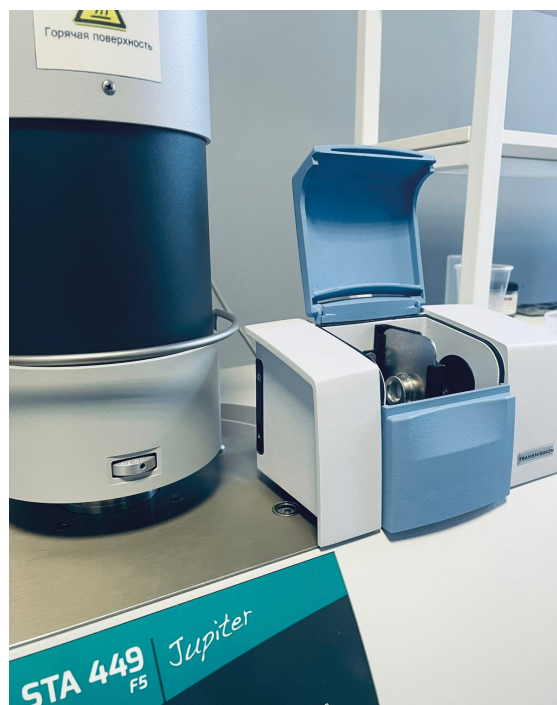


Рис. 1. Фурье-спектрометр Perseus STA 449 F5 Jupiter
Fig. 1. Perseus STA 449 F5 Jupiter Fourier spectrometer

– Область 1300–900 см⁻¹: валентные колебания связей С–О–С, Р=О, Р–О–Р, Р–О–С, характерные для эпоксидной матрицы и полифосфатного антипирена.

– Область ниже 900 см⁻¹: деформационные колебания органического скелета и валентные колебания Si–O–Si, Al–O минерального наполнителя.

Сравнительный анализ спектров образцов № 1 и 2 был нацелен на выявление различий в интенсивности и форме указанных полос, что является прямым свидетельством химических превращений, произошедших в материале в процессе эксплуатации.

Результаты

На основе полученных ИК-спектров (рис. 2 и 3) проведена их расшифровка и сравнительный анализ для установления химического состава огнезащитного покрытия и выявления характера деструктивных изменений в образцах после различной эксплуатации.

В табл. 1 представлена детальная интерпретация основных полос поглощения, наблюдаемых в ИК-спектрах исследуемых образцов, которая служит основой для качественной оценки состава материала.

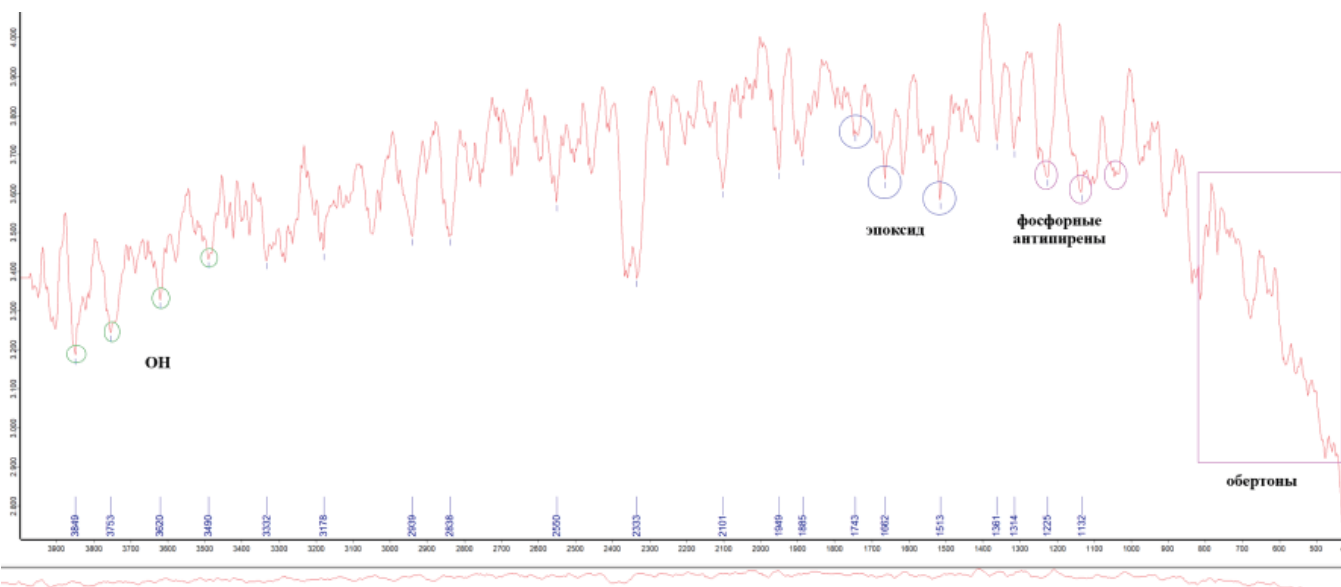


Рис. 2. ИК-спектр покрытия образца № 1
Fig. 2. IR spectrum of the sample No. 1 coating

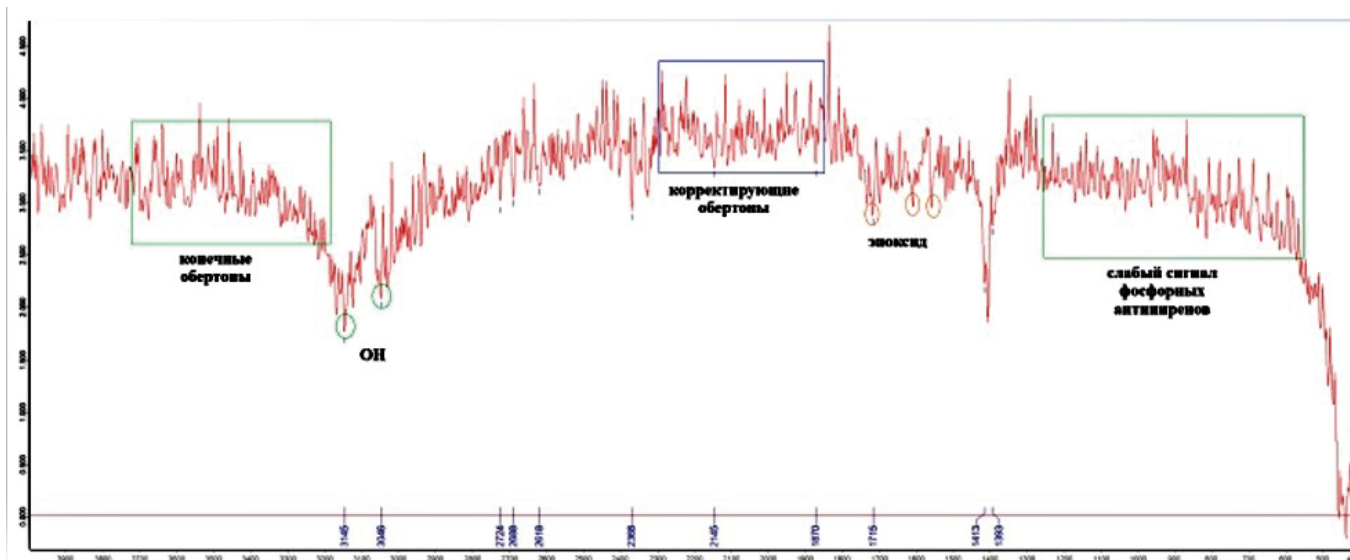


Рис. 3. ИК-спектр покрытия образца № 2
 Fig. 3. IR spectrum of the sample No. 2 coating

Таблица 1

Интерпретация характеристических полос ИК-спектров покрытий

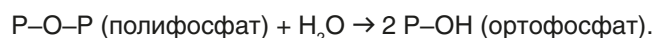
Table 1

Interpretation of characteristic bands of the IR spectrum of the coatings

ν , cm^{-1}	Интерпретация (функциональная группа, тип колебания)	Краткое обоснование
3849–3753	Свободные О–Н / Н-связанные ОН (высокочастотные кромки)	Слабые острые пики, характерные для свободных или слабосвязанных ОН-групп на поверхности минеральных частиц [8]
3620–3490	Связанная вода / гидроксильные группы (О–Н, Н-связи)	Широкая полоса, типичная для адсорбированной влаги и поверхностных гидроксидов Si–ОН, Al–ОН минерального наполнителя [8]
3330–3200	N–H (аминные) и/или О–Н (сильные водородные связи)	Область валентных колебаний аминных групп отвердителя и сильно связанной воды в порах материала
3000–2850	C–H (алкановые, CH ₂ , CH ₃)	Валентные колебания метиленовых и метильных групп, подтверждающие наличие органической полимерной матрицы (эпоксидной/акрилатной)
1740–1700	C=O (карбонильные группы эфиров, кетонов)	Интенсивный пик, характерный для сложноэфирных фрагментов эпоксидно-акрилатного связующего
1612–1600	C=C (ароматические) / N–H (деформационные)	Указывает на наличие ароматических структур или деформационных колебаний амидных/аминных групп
1516–1490	N–H (деформационные), аминные группы, ароматика	Подтверждает наличие аминов отвердителя и ароматических модификаторов в составе
1260–1188	C–O (эфирные) / P=O, P–O (фосфатные)	Интенсивная область, объединяющая валентные колебания эфирных связей C–O–C полимерной матрицы и фосфор-кислородных связей P=O и P–O антипирена [7]
1122–1050	C–O, C–N, P–O–C (эпоксидные циклы, эфиры, фосфаты)	Комплексная полоса, характерная для эпоксидных циклов, простых эфиров и фосфор-эфирных связей (P–O–C) [6, 7]
963–956	Эпоксидные «отпечатки» (C–O–C)	Специфический пик, ассоциируемый с эпоксидными циклами; его ослабление – признак разрушения матрицы
520–470	Si–O–Si / M–O (минеральные оксиды)	Валентные колебания в силоксановой сетке (Si–O–Si) и других оксидов металлов, «отпечаток» минеральной фазы наполнителя [8]

Сравнительный анализ ИК-спектров образцов из открытого и закрытого контуров выявил значительные различия, обусловленные различной влажностной нагрузкой.

В спектре образца № 1 (закрытый контур) отчетливо наблюдаются выраженные полосы в областях $1240\text{--}1180\text{ см}^{-1}$ (P=O), $1120\text{--}1080\text{ см}^{-1}$ (P–O–P) и $1020\text{--}980\text{ см}^{-1}$ (мостиковые P–O–P). Это свидетельствует о частичной сохранности полифосфатной сетки, ответственной за огнезащитный эффект. В спектре образца № 2 (открытый контур) данные полосы резко ослаблены или практически отсутствуют, что является прямым доказательством глубокого гидролитического разрушения антипирена. Процесс протекает по реакции:



В дальнейшем происходит вымывание образовавшихся ортофосфатов атмосферной влагой [1, 7].

Интенсивность широкой полосы в области $3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, отвечающей за валентные колебания ассоциированных O–H групп, в образце № 2 существенно выше, чем в образце № 1. Это подтверждает значительно более высокую степень водопоглощения и насыщения покрытия влагой при эксплуатации в открытом контуре. Образование дополнительных гидрофильных центров P–OH в результате гидролиза антипирена еще более усиливает этот эффект.

В обоих образцах присутствуют полосы валентных колебаний C–H ($\approx 2920, 2850\text{ см}^{-1}$), что указывает на сохранность органического скелета. Однако в образце № 2 наблюдается заметное ослабление полос в областях $1260\text{--}1180\text{ см}^{-1}$ (C–O–C) и $963\text{--}956\text{ см}^{-1}$ (эпоксидные циклы) по сравнению с образцом № 1. Это свидетельствует о прогрессирующем гидролитическом расщеплении эпоксидной матрицы и эфирных связей под прямым воздействием атмосферной влаги [6].

Ключевыми факторами, обуславливающими повышенную гигроскопичность огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем, определяющую последующую деструкцию в условиях эксплуатации, являются:

– Наличие гидрофильных центров (–OH, –NH) является первичной причиной активного взаимодействия материала с атмосферной влагой. Так, полученные спектры демонстрируют выраженные полосы поглощения в областях, характерных для полярных групп, что предопределяет высокую сорбционную активность материала по отношению к воде. Широкая полоса в области $3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ соответствует валентным колебаниям O–H связей, связанных водородными связями. Это указывает на значительное количество адсорбированной влаги и поверхностных гидроксильных групп (Si–OH, Al–OH) минерального наполнителя [8]. Полосы в области $3400\text{--}3300\text{ см}^{-1}$ и $1510\text{--}1480\text{ см}^{-1}$ соответствуют валентным

и деформационным колебаниям N–H связей аминных групп отвердителя:

– Наличие пористой микроструктуры и минерального наполнителя. Интенсивное поглощение в области OH-групп ($3600\text{--}3200\text{ см}^{-1}$) и наличие низкочастотных полос Si–O–Si / Al–O ($650\text{--}520\text{ см}^{-1}$) свидетельствуют о развитой удельной поверхности минеральной фазы. Пористая структура наполнителя создает разветвленную капиллярную систему, способствующую не только адсорбции, но и капиллярной конденсации паров воды, что многократно увеличивает общее водопоглощение и обеспечивает транспорт влаги вглубь покрытия.

– Гидролиз как основной деструктивный процесс, что подтверждается ослаблением полос P–O–P и C–O–C в образце закрытого контура.

Проникновение воды инициирует два параллельных и взаимосвязанных процесса гидролиза:

1. Гидролиз антипиреновой составляющей: наиболее уязвимыми являются мостиковые связи P–O–P в полифосфатной сетке. Их расщепление приводит к деполимеризации антипирена и его вымыванию, что напрямую ведет к потере огнезащитной функции [7].

2. Гидролиз полимерной матрицы: молекулы воды атакуют полярные связи C–O–C эпоксидной матрицы и C–N аминных сшивок, что приводит к снижению молекулярной массы, пластификации и потере когезионной прочности связующего [6].

Результаты однозначно демонстрируют, что доминирующим механизмом деградации покрытий является гидролиз, а степень химического разрушения покрытия имеет прямую корреляцию с уровнем и продолжительностью влажностного воздействия в процессе эксплуатации. Деградация огнезащитного покрытия происходит последовательно, в несколько этапов:

Этап 1 – инициирующая сорбция атмосферной влаги. Благодаря наличию гидрофильных групп (–OH наполнителя, –NH аминов) и пористой микроструктуре материал активно сорбирует воду из атмосферы.

Этап 2 – гидролиз ключевых связей. Адсорбированная вода выступает как реагент, вызывая гидролитическое расщепление наиболее уязвимых химических связей: сначала мостиковых P–O–P в антипирене, затем C–O–C в эпоксидной матрице и C–N в аминных сшивках.

Этап 3 – потеря функциональности и когезии. Деструкция антипирена приводит к потере огнезащитных свойств. Гидролиз полимерной сетки вызывает снижение молекулярной массы, пластификацию и потерю когезионной прочности.

Этап 4 – ускорение деструкции. Образующиеся гидрофильные продукты гидролиза (например, P–OH) усиливают водопоглощение, создавая положительную обратную связь и ускоряя дальнейшее разрушение. Циклы «увлажнение – сушка» создают дополнительные механические напряжения.

Заключение

Проведенный сравнительный ИК-спектральный анализ позволил установить механизмы и степень деструкции огнезащитного покрытия на эпоксидно-акрилатном связующем при эксплуатации в условиях с различной влажностной нагрузкой.

Установлено, что для образца из закрытого контура (УХЛЗ) характерна частичная сохранность ключевых функциональных групп. В спектре наблюдаются полосы полифосфатного антипирена (1240–980 см⁻¹) и эпоксидной матрицы, однако наличие интенсивной полосы О–Н (3600–3200 см⁻¹) свидетельствует о водопоглощении и начальных стадиях гидролиза.

Для образца из открытого контура выявлены признаки глубокой деградации: практически полное исчезновение полос антипирена, значительное усиление полосы О–Н и ослабление сигнатур эпоксидной матрицы. Это указывает на интенсивное гидролитическое разрушение и вымывание активных компонентов.

На основе спектральных данных установлен доминирующий механизм гидролитической деструкции, последовательно включающий сорбцию влаги гидрофильными группами, расщепление связей Р–О–Р, С–О–С, С–N и последующую потерю функциональных свойств. Результаты подтверждают, что длительное прямое воздействие атмосферной влаги является критическим фактором, приводящим к необратимой потере огнезащитной эффективности покрытия. Метод ИК-Фурье спектроскопии показал высокую эффективность для диагностики подобных процессов деградации.

Список литературы

1. Докучаева Л.В., Старостенков А.С., Мельников Н.О. Исследование процессов ускоренного старения огнезащитных покрытий // *Успехи в химии и химической технологии*. 2012. № 2 (131). С. 99–104. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protseessov-uskorenogo-stareniya-ognezashchitnyh-pokrytiy?ysclid=ml7xmf06tz266373686>.
2. ГОСТ Р 57941-2017. Композиты полимерные. Инфракрасная спектроскопия. Качественный анализ. Москва: Стандартинформ, 2017.
3. Комарова М.А., Гришин И.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Ведяков М.И. Оценка эффективности огнезащитных покрытий в процессе ускоренного климатического старения // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024. № 3 (42). С. 28–46. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46). EDN: TLKAPC.
4. Комарова М.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Скоробогатов В.А., Головина Е.В. Огнезащитная эффективность покрытий металлических строительных конструкций при ускоренном климатическом старении // *Техносферная безопасность*. 2024. № 4 (45). С. 3–22. EDN: NBZDZG.

5. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Москва: Стандартинформ, 2010.
6. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: Основы, техника, аналитического применение: пер. с англ. Москва: Мир, 1982. 327 с.
7. Коровин Я.С., Жаров В.Т. Инфракрасные спектры и структура фосфорорганических соединений. Москва: Наука, 1985. 240 с.
8. Исаакян А.Р., Бегларян А.А., Пирумян П.А. и др. ИК-спектроскопическое исследование аморфных диоксидов кремния // *Журнал физической химии*. 2011. № 1 (85). С. 78–81. EDN NDJHKN.

References

1. Dokuchaeva L.V., Starostenkov A.S., Mel'nikov N.O. Research on accelerated aging of fire-resistant coatings. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii = Advances in chemistry and chemical technology*, 2012. no. 2 (131), pp. 99–104. (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protseessov-uskorenogo-stareniya-ognezashchitnyh-pokrytiy?ysclid=ml7xmf06tz266373686>.
2. State Standard R 57941-2017. Polymer composites. Infrared spectroscopy. Qualitative analysis. Moscow: Standartinform Publ., 2017. (In Russian).
3. Komarova M.A., Grishin I.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Vedyakov M.I. Efficiency assessment of flame retardant coatings in the process of accelerated climatic aging. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2024, no. 3 (42), pp. 28–46. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46). EDN: TLKAPC.
4. Komarova M.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Skorobogatov V.A., Golovina E.V. Fire-resistant effectiveness of coatings of metal building structures with accelerated climatic aging. *Tehnosfernaya bezopasnost' = Technosphere safety*, 2024, no. 4 (45), pp. 3–22. (In Russian). EDN: NBZDZG.
5. State Standard 15150-69. Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence. Moscow: Standartinform Publ., 2010. (In Russian).
6. Smith A. Applied IR spectroscopy: Fundamentals, technique, analytical application: translated from English. Moscow: Mir Publ., 1982, 327 p. (In Russian).
7. Korovin Ya.S., Zharov V.T. Infrared spectra and structure of organophosphorus compounds. Moscow: Science Publ., 1985, 240 p. (In Russian).
8. Isaakyan A.R., Beglaryan A.A., Pirumyan P.A. et al.

IR Spectroscopic Study of Amorphous Silicon Dioxide. *Zhurnal fizicheskoy khimii = Russian Journal of Physical Chemistry*, 2011. no. 1 (85). pp. 78–81. (In Russian). EDN NDJHKH.

**Информация об авторах /
Information about the authors**

Мария Александровна Комарова, канд. хим. наук, руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Maria A. Komarova, Cand. Sci. (Chem.), Bureau Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Иван Иванович Ведяков, д-р техн. наук, профессор, директор, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ivan I. Vedyakov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Михаил Валерьевич Шалабин[✉], аспирант, заведующий лабораторией научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Mikhail V. Shalabin[✉], Graduate Student, Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Игорь Андреевич Власкин, инженер научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; студент 1-го курса магистратуры кафедры техносферной безопасности, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва

Igor A. Vlaskin, Engineer, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; 1st year student of the Master's degree in Technosphere Security Department, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author