

Научная статья
УДК 614.849
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.62.22.003

Оценка качества результатов применения методики исследования интумесцентных огнезащитных покрытий с помощью портативного устройства высокотемпературного прогрева

*Михаил Сергеевич Цыганков^{1,2}
Юлия Николаевна Бельшина¹
Валентин Алексеевич Ломан²*

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Михаил Сергеевич Цыганков, 33mixan33@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается новый подход к контролю качества огнезащитного покрытия металлоконструкций с использованием портативного устройства высокотемпературного прогрева. Проведён критический анализ проблемы повышения огнестойкости металлических конструкций с использованием вспучивающихся огнезащитных покрытий. Проведены испытания пяти образцов огнезащитных составов, изъятых с объектов защиты. Проведенный анализ методом ИК-спектроскопии показал, что все образцы относятся к огнезащитным вспучивающимся покрытиям на акриловой основе сложного состава. В рамках оценки достоверности результатов испытания проводились по существующему лабораторному методу в соответствии с ГОСТ Р 59637-2021, а также по новой методике, основанной на применении разработанного портативного устройства. Обе методики показали схожие результаты. Для численной оценки и сравнения полученных результатов и подтверждения работоспособности разработанной методики был проведен анализ полученных результатов с помощью статистических критериев Кохрена и Граббса. Значения рассчитанных критериев подтвердили сопоставимость получаемых результатов по однородности и отсутствию грубых ошибок с методикой ГОСТ Р 59637-2021. Полученные результаты подтверждают работоспособность новой методики, основанной на применении портативного устройства высокотемпературного прогрева тонких огнезащитных вспучивающихся покрытий, нанесенных на металлическую подложку. Описано практическое значение полученных результатов, а также перспективы дальнейшего развития темы.

Ключевые слова: вспучивающиеся огнезащитные покрытия, метод проверки качества огнезащитной обработки, пожарная безопасность металлоконструкций

Для цитирования: Цыганков М.С., Бельшина Ю.Н., Ломан В.А. Оценка качества результатов применения методики исследования интумесцентных огнезащитных покрытий с помощью портативного устройства высокотемпературного прогрева // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 323-334.
<https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.62.22.003>.

Original article.

Evaluation of the quality of the results of the application of the intumescent flame retardant coatings research methodology using a portable high-temperature heating device

Mikhail S. Tsygankov^{1,2}

*Yulia N. Belshina*¹

*Valentin A. Loman*²

¹*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia*

²*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Corresponding author: *Alexander S. Simonenko, simonfps@yandex.ru*

Abstract. The article discusses a new approach to quality control of flame-retardant coating of metal structures using a portable high-temperature heating device. A critical analysis of the problem of increasing the fire resistance of metal structures using bulging flame-retardant coatings has been carried out. Five samples of flame retardants seized from the protection facilities were tested. The analysis by IR spectroscopy showed that all the samples belong to flame-retardant bulging acrylic-based coatings of complex composition. As part of the assessment of the reliability of the results, the tests were carried out using the existing laboratory method in accordance with GOST R 59637-2021, as well as using a new technique based on the use of a developed portable device. Both methods showed similar results. To numerically evaluate and compare the results obtained and confirm the operability of the developed methodology, the results were analyzed using the statistical criteria of Kohren and Grubbs. The values of the calculated criteria confirmed the comparability of the obtained results in terms of uniformity and absence of gross errors with the methodology of GOST R 59637-2021. The results obtained confirm the operability of a new technique based on the use of a portable device for high-temperature heating of thin flame-retardant bulging coatings applied to a metal substrate. The practical significance of the results obtained is described, as well as the prospects for further development of the topic.

Keywords: bulging flame-retardant coatings, method of quality control of flame-retardant treatment, fire safety of metal structures

For citation: Tsygankov M.S., Belshina Yu.N., Loman V.A. Evaluation of the quality of the results of the application of the methodology for the study of intumescent flame-retardant coatings using a portable high-temperature heating device // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 323-334. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.62.22.003>.

Введение

Проблема повышения огнестойкости металлических конструкций в настоящее время решается с помощью применения методов пассивной огнезащиты, среди которых большое распространение получают огнезащитные вспучивающиеся (интумесцентные) покрытия (ОВП), применение которых позволяет обеспечить защиту металлоконструкций от критического нагрева на пожаре в течение 120 и более минут. В последние несколько десятков лет значительно усиливается интенсивность индустриализации и строительства с применением металлоконструкций, следовательно, растут и объёмы применения огнезащитных покрытий. При этом применение ОВП эффективно только в случае сохранения ими способности к образованию объёмного теплоизолирующего слоя пенококса при многократном увеличении толщины покрытия за счет протекающих в нем химическом превращении. В случае, если покрытия из-за нарушения технологии нанесения или использования некачественного лакокрасочного материала (контрафакта) изначально не способно к обеспечению образования защитного слоя или утратило данную способность в процессе эксплуатации под влиянием различных внешних факторов и механизм превращения не сработает, то металлоконструкции останутся незащищёнными, что приведёт к стремительному разрушению объекта защиты.

В настоящее время оценка огнезащитных свойств ОВП в основном проводится с помощью проведения лабораторных испытаний, кроме того, не теряют актуальности научные исследования, направленные на поиск корреляций между результатами исследования химического состава покрытия различными инструментальными аналитическими методами и фактической эффективностью для разработки соответствующих методик. Испытания ОВП при нагреве в муфельной печи достаточно эффективно и позволяет четко оценить его работоспособность по параметру высоты образующегося пенококса, но применение данного способа оценки огнезащитной эффективности требует отбора проб. При снятии ОВП с подложки возможно его разрушение, поэтому по факту площадь повреждаемого при отборе проб покрытия превышает установленные ГОСТом размеры образцов, кроме того, отбор сопровождается нарушением структуры материала, что может сказаться на достоверности результатов проведенных экспериментов. Стандартные методики, используемые для решения данной проблемы, предполагают проведение серии параллельных испытаний, но данное обстоятельство не исключает вероятность ошибки в следствие некачественного пробоотбора. Использование физико-химических методов исследования молекулярного, элементного или функционального состава позволяет оценить природу покрытия и сделать вывод о присутствии в нем компонентов, участвующих в образовании при нагреве теплоизолирующего слоя, однако не позволяют достоверно утверждать, что при внешнем термическом воздействии механизм огнезащиты сработает. Проведенный анализ информации в области огнезащитной обработки металлоконструкций с использованием тонкослойных вспучивающихся огнезащитных покрытий позволил сделать вывод, что существующие подходы к оценке огнезащитных характеристик ОВП нельзя считать однозначно эффективными не исключая вероятность негативных последствий [1-3]. В этой связи представляется актуальным внедрение в практику исследования ОВП портативных устройств, позволяющих проводить испытание их огнезащитной эффективности непосредственно на месте без необходимости отбора проб. Многими специалистами в области огнезащиты [3, 4] подчеркивается значимость проблемы, связанной с отсутствием доступного полевого метода контроля вспучивающихся огнезащитных покрытий, и обосновывается необходимость его создания. Авторами предлагается портативное устройство (прибор) для оценки качества ОВП по высоте образующегося пенококса, разработанный для применения непосредственно на объекте защиты (в полевых условиях) [5, 6]. Ключевыми преимуществами предложенного подхода являются: исключение использования открытого пламени, обеспечение температурного режима, достаточного для полного вспучивания всего слоя покрытия (на всю глубину), а также применение принципа двустороннего прогрева. Данный принцип позволяет минимизировать отвод тепла через металлическую конструкцию, что существенно сокращает продолжительность испытаний.

В основу разработки положен метод электромагнитной индукции. Основная идея предлагаемого метода заключается в создании на поверхности интумесцентного огнезащитного покрытия для металлоконструкций температуры, достаточной для вспучивания, при помощи двустороннего теплового воздействия: с одной стороны за счет теплового излучения выделяемого при накаливании металлического цилиндра от электромагнитной индукции и/или теплового (лучистого) излучения выделяемого при разогреве нагревательного элемента в виде проволоки (из нихрома и т.п.), с другой стороны, прогревом покрытия в месте контакта с металлической подложкой, посредством ее локального индукционного разогрева.

Проведенные предварительные испытания эффективности разработанного устройства показали его работоспособность при исследовании ОВП в лабораторных условиях, но для внедрения его в практику необходимо провести оценку качества получаемых результатов и разработать методику его применения, что и стало целью данного исследования.

Методы исследования

Используемые в работе огнезащитные лакокрасочные материалы (ЛКМ) были отобраны сотрудниками МЧС России на различных объектах защиты в ходе контрольных (надзорных) мероприятий. Всего было проанализировано 5 образцов ЛКМ различных торговых марок. Для чистоты эксперимента образцы были обезличены, каждому из них был присвоен порядковый номер.

Для получения покрытий огнезащитные составы были нанесены в лабораторных условиях на загрунтованные стальные пластины толщиной 2 мм. Всего было рассмотрено 5 различных образцов ОВП. В соответствии с технологией нанесения покрытие наносилось послойно, при помощи специальной кисти, и последовательной сушкой каждого слоя в условиях лаборатории не менее 24 часов. Готовые образцы подвергали испытаниям по п.6.5 ГОСТ 59637-2021 и с помощью разработанного авторами портативного устройства (Рис.1) [7].



Рис.1. Портативное устройство для определения коэффициента вспучивания

При испытаниях по ГОСТ 59637-2021 пробы огнезащитного покрытия, нанесенные на металлическую полочку, снимали до грунта, не захватывая его, после чего из полученных образцов вырезали по 3 диска диаметром 3–5 мм. Полученные диски размещали на негорючую подложку и выдерживали в муфельной печи при температуре 600 °С в течение 5 минут. Пример результата испытаний ОВП по стандартной методике приведен на Рис.2.

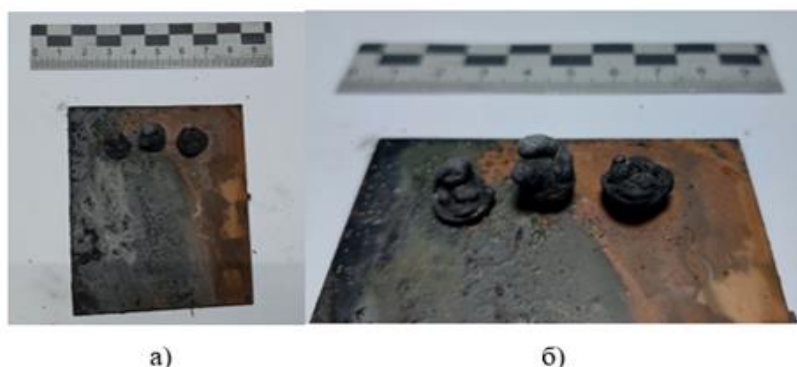


Рис.2. Вид огнезащитного вспучивающегося покрытия (образец № 1) после испытания по ГОСТ 59637-2021: а – вид сверху, б - вид сбоку

Измерение высоты пенококса проводили с помощью штангенциркуля (RGK SCM-150, з/н: 24К151731, свидетельство о поверке: С-ЕВЕ/30-04-2025/430646500), за конечный результат принимали усредненное значение трех измерений. Значение коэффициента вспучивания ($K_{вс}$) рассчитывали, как отношение толщины вспученного слоя (h) к исходной толщине покрытия (h_0) [8].

Подготовка образцов ОВП для испытаний разработанным портативным устройством не отличалась от описанной ранее и состояла в нанесении исходного ЛКМ на подложку, после чего с помощью разработанного портативного устройства на поверхность покрытий воздействовали тепловым потоком для достижения требуемой температуры. В ходе испытаний температура на поверхности образца составляла 600 °С, время термического воздействия 5 минут. Пример результата вспучивания покрытия при использовании разработанного портативного устройства приведен на Рис.3.

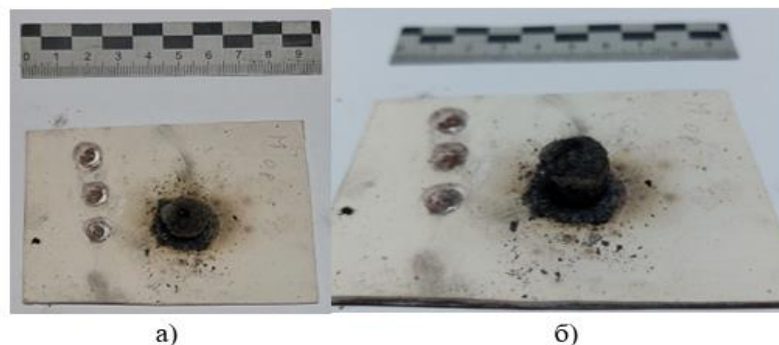


Рис.3. Вид огнезащитного вспучивающегося покрытия (образец № 1) после применения разработанного устройства (а – вид сверху, б - вид сбоку)

По полученной высоте вспученного слоя рассчитывали коэффициент вспучивания, в данном случае проводили одно измерение.

Для оценки качества получаемых результатов было проведено по 30 испытаний для каждого вида ОВП, как по методике, регламентируемой ГОСТ 59637-2021, так и с помощью разработанного портативного устройства.

Для характеристики молекулярного состава рассмотренных огнезащитных покрытий в работе применялся метод инфракрасной спектроскопии, который широко применяется в области пожарно-технической экспертизы для решения диагностических и идентификационных задач, в том числе, при исследовании лакокрасочных покрытий [9-11]. Съемка спектров проводилась в режиме пропускания в спектральном диапазоне 400-4000 см⁻¹. Подготовка образцов для исследования состояла в запрессовке их в матрицу из бромиды калия.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследования были проведены испытания образцов по методике ГОСТ 59637-2021, полученные результаты приведены в Табл.1. Среди рассмотренных образцов четыре показали высокие значения коэффициента вспучивания, образец №5 в объеме не увеличился.

Табл.1. Результаты испытаний по определению коэффициента вспучивания в соответствии с методикой ГОСТ Р 59637-2021

№ образца ОВП	Среднее значение h_0 , мм	$K_{вс} = h/h_0$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7±0,1	10,8	11,0	11,1	10,4	10,6	10,5	11,0	11,0	11,1	10,1
		10,9	10,5	10,4	10,8	11,1	11,3	10,9	10,9	10,8	10,6
		11,0	10,6	11,1	10,8	10,9	10,5	11,0	10,9	11,1	10,8
2	0,8±0,1	21,6	20,9	20,9	21,4	21,3	21,6	21,2	20,9	21,9	21,3
		21,6	21,4	21,1	20,8	22,0	21,2	20,7	20,2	21,4	21,3
		20,4	22,0	20,9	21,0	20,6	19,2	19,6	20,2	20,0	21,4
3	1,2±0,2	9,9	12,6	11,2	11,9	12,4	10,6	10,9	12,2	12,1	11,7
		12,8	12,8	12,5	12,3	12,5	11,7	12,8	10,9	12,5	11,5
		12,2	11,9	12,8	11,2	12,7	12,5	12,7	13,4	13,0	11,9

4	1,1±0,2	11,3	11,3	11,3	11,3	11,0	11,4	11,5	12,4	11,3	11,3
		11,1	11,3	12,1	10,9	11,7	11,9	11,3	11,3	11,6	11,6
		11,2	11,8	11,5	11,9	11,3	11,5	11,6	11,4	11,3	11,3
5	1,0±0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Как известно для огнезащиты металлических конструкций могут применяться покрытия на основе силикатов (жидкого стекла), которые при нагреве не вспучиваются, а образуют своеобразное стеклянное покрытие, защищающее поверхность, было выдвинуто предположение, что к данной группе относится образец ОВП №5. Внешний вид образца №5 после испытаний представлен на Рис.4, и как видно, после проведения испытаний на поверхности фиксируется образование твердой корки.

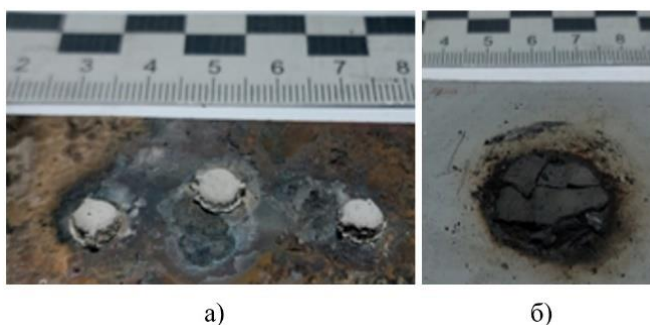


Рис.4. Вид огнезащитного вспучивающегося покрытия (образец ОВП № 5) после испытаний:
 1 – по методике ГОСТ Р 59637-2021, 2 – с применением разработанного портативного устройства

Для объяснения наблюдаемой картины были проанализированы ИК-спектры образцов ОВП. Полученные результаты спектрального анализа не подтвердили предположение, что образец №5 относится к не вспучивающимся огнезащитным покрытиям (Рис.5).

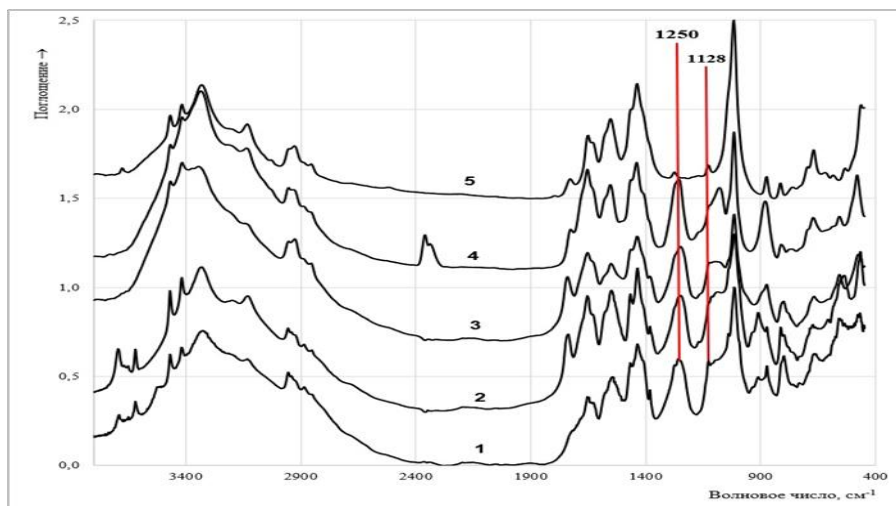


Рис.5. ИК-спектры образцов ОВП

В соответствии с результатами спектральных исследований все пять образцов могут быть отнесены к огнезащитным вспучивающимся покрытиям на акриловой основе сложного состава. На полученных спектрах образцов №1 и №2 полосы поглощения ~ 3690 и ~ 3620 cm^{-1} связаны с валентными колебаниями O-H ($\nu(\text{O-H})$) каолинита ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), это ключевой маркер данного наполнителя. Серия полос 3508, 3468, 3414, 3317 cm^{-1} , фиксируемая на все спектрах, связаны с валентными колебаниями N-H ($\nu(\text{N-H})$) полифосфата аммония (ПФА) и меламина. Полоса 3122 cm^{-1} характерна для валентных колебаний N-H в меламине. Полосы 2953, 2882

cm^{-1} связаны с асимметричными и симметричными валентными колебаниям С-Н ($\nu_{\text{as}}(\text{CH}_3)$, $\nu_{\text{s}}(\text{CH}_3)$) в метильных и метиленовых группах, что указывает на органическое связующее (акриловый полимер). Полоса 1541 cm^{-1} относится к деформационным колебаниям N-H ($\delta(\text{N-H})$, амид II). Полосы $1452, 1435 \text{ cm}^{-1}$ - к деформационным колебаниям С-Н ($\delta(\text{CH}_2, \text{CH}_3)$) в метиленовых и метильных группах акрилового полимера. Полоса 1250 cm^{-1} связана с валентными колебаниями P=O ($\nu(\text{P=O})$) в полифосфате аммония. Полоса 1013 cm^{-1} - с валентными колебаниями Si-O ($\nu(\text{Si-O})$) в силикатной решетке каолинита и валентными колебаниями P-O-C ($\nu(\text{P-O-C})$) в полифосфате аммония. Полоса 872 cm^{-1} относится к внеплоскостным деформационным колебаниям карбонат-иона ($\delta(\text{CO}_3^{2-})$), что указывает на наличие мела. Полоса 796 cm^{-1} может быть отнесена к колебаниям в силикатах. Полосы $657, 548 \text{ cm}^{-1}$ характерны для деформационных колебаний Si-O-Si и Si-O-Al в структуре каолинита. Полоса 467 cm^{-1} связана с деформационными колебаниями Si-O-Si. Таким образом, полученные спектры ОВП соответствуют лакокрасочным покрытиям на основе акрилового связующего с огнезащитной системой, содержащей ПФА, меламин и пентаэритрит, а также неорганические наполнители, скорее всего тальк, каолинит и мел [12].

Спектр ОВП №5 также говорит о присутствии в образце меламин и пентаэритрита, но как можно видеть на рис. 5, для данного покрытия на спектре отсутствуют полосы фосфатной группировки, а фиксируемые малоинтенсивные полосы $\sim 1250 \text{ cm}^{-1}$ и $\sim 1128 \text{ cm}^{-1}$ относятся к пентаэритриту. Как известно, для вспучивающихся огнезащитных составов чаще всего используются компоненты «огнезащитной триады» — это меламин, пентаэритрит и полифосфат аммония. В данной триаде полифосфат аммония выступает ключевым компонентом рецептуры огнезащитных лакокрасочных материалов. Именно он под воздействием высоких температур пламени разлагается с выделением негорючего газа, который формирует защитный барьер, ограничивающий доступ кислорода к материалу. Одновременно остаточная полифосфатная кислота катализирует реакцию пенообразования при выделении свободного углерода. Неудовлетворительный результат испытаний образца № 5, очевидно, обусловлен нарушением компонентного состава огнезащитной композиции. Причиной может быть использование некачественного лакокрасочного материала или изменения связанные со старением покрытия.

Следующим этапом работы стало исследование огнезащитной эффективности покрытий с помощью разработанного портативного устройства. Главным преимуществом его использования является возможность получения результата непосредственно на объекте, исключая возможные ошибки на этапе отбора пробы и доставки ее в лабораторию. Методика исследования ОВП, основанная на данном оборудовании, состоит в определении толщины исходного покрытия, измерении высоты слоя пенококса, образующегося под воздействием теплового излучения и индукционного разогрева металлической основы с помощью разработанного устройства, и расчета коэффициента вспучивания. Результаты полученных значений коэффициента вспучивания представлены в Табл.2. Как видно образец №5 также не показал положительных результатов.

Таб.2. Результаты испытаний по определению коэффициента вспучивания при использовании портативного устройства

№ образца ОВП	Среднее значение h_0 , мм	$K_{\text{вс}} = h/h_0$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7±0,1	15,1	18,1	16,0	14,1	18,6	15,5	15,9	15,5	16,6	17,5
		15,3	16,1	14,6	16,3	16,5	14,9	15,5	16,1	17,8	17,5
		17,4	18,1	15,9	14,0	14,5	16,8	15,0	16,0	17,6	15,6
2	0,8±0,1	25,9	26,2	26,9	25,3	25,9	26,2	26,6	27,1	28,3	26,8
		26,2	27,8	25,2	25,6	24,8	26,4	26,0	26,4	27,3	25,6
		26,0	28,0	27,0	26,9	27,2	27,1	25,9	27,3	26,7	26,3

3	1,2±0,2	14,4	14,1	14,2	14,2	14,2	13,9	14,6	13,8	14,2	14,0
		14,4	14,2	13,9	13,6	13,8	13,8	14,3	14,3	14,3	14,2
		14,8	14,6	14,2	14,4	14,5	14,5	13,8	14,0	14,2	14,5
4	1,1±0,2	16,8	17,8	18,5	18,8	17,4	17,9	18,4	19,3	18,9	18,8
		18,9	18,7	19,1	17,6	18,5	19,7	18,7	19,0	19,0	17,4
		18,4	18,8	17,3	17,8	18,3	18,3	19,2	18,8	18,8	18,7
5	1,0±0,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Для образцов огнезащитных покрытий №1-№4 (вспучившихся в ходе испытаний выбранными в работе методами) рассчитанное значение коэффициента вспучивания по результатам применения портативного устройства во всех случаях превышает значение, полученное по методике ГОСТ Р 59637-2021. Для наглядности сопоставление результатов представлено в виде гистограммы (Рис.6). Данное обстоятельство может быть объяснено различиями в условиях проведения испытаний. В случае использования портативного устройства происходит локальный нагрев покрытия на всю глубину, поэтому процессы, приводящие к вспучиванию покрытия происходят более полно. Образцы покрытий №1 и №2 более тонкие, для них разница между результатами, полученными с помощью разных методик, находится на одном уровне и относительно незначительна.

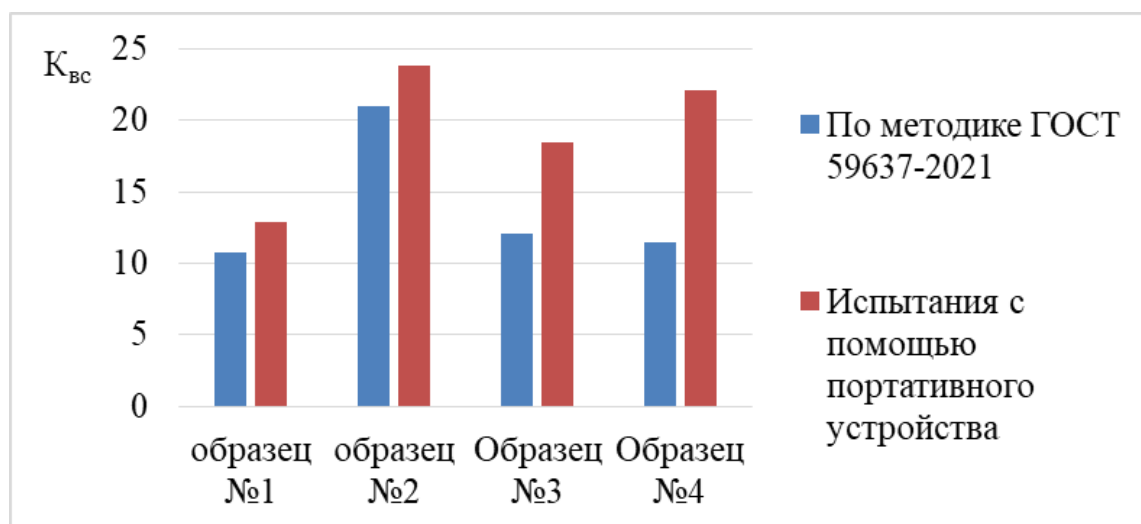


Рис.6. Сопоставление полученных разными методами значений коэффициентов вспучивания

Средние значения коэффициентов вспучивания для разных ОВП, значения дисперсий и среднеквадратичных отклонений результатов проведенных многократных измерений приведены в Табл.3.

Табл.3. Метрологические характеристики полученных результатов многократных измерений

№ образца ОВП	Результаты, полученные по методике ГОСТ Р 59637-2021			Результаты, полученные при использовании портативного устройства		
	Среднее значение $K_{вс}$	Дисперсия	СКО, %	Среднее значение $K_{вс}$	Дисперсия	СКО, %
1	10,8	0,07	2,5	16,1	1,55	7,7
2	21,0	0,45	3,2	26,5	0,70	3,5
3	12,1	0,64	6,6	14,2	0,08	2,0
4	11,4	0,11	2,9	18,4	0,45	3,6

Как видно разброс получаемых значений для обоих рассмотренных в работе методов достаточно большой, но находится в одном порядке. Для сравнения качества полученных

результатов необходимо использовать статистические методы, через которые данная оценка может реализовываться численно. Измерение коэффициента вспучивания не относится к методикам количественных измерений, тем не менее подходы, применяемые в них для оценки качества полученных результатов, могут позволить наглядно сравнить результаты, полученные разными методами, которые и были использованы в данной работе.

Само значение коэффициента вспучивания является расчетным, для его определения используется два результата измерений – исходного покрытия и покрытия после вспучивания. Для проведения сравнения полученных результатов на предмет их однородности и воспроизводимости были проанализированы результаты измерения высоты слоя пенококса с помощью методик ГОСТ Р 59637-2021 и новой методики, основанной на применении разработанного портативного устройства.

Для удобства полученные результаты измерения высоты пенококса приведены в виде таблицы. За основу статистической обработки полученных результатов была взята методика оценки однородности получаемых результатов с помощью критерия Кохрена (G_{max}) и оценка наличия в полученных результатов грубых ошибок с помощью критерия Граббса [13]. Полученные значения статистических критериев также приведены в Табл.4.

Табл.4. Сравнение результатов измерения высоты по методике ГОСТ Р 59637-2021 и с помощью разработанного портативного устройства

Номер измерения	Новая методика				Методика ГОСТ Р 59637-2021			
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4
1	12,1	23,3	18,7	20,1	8,6	19,4	12,9	13,5
2	14,5	23,6	18,3	21,4	8,8	18,8	16,4	13,5
3	12,8	24,2	18,5	22,2	8,9	18,8	14,5	13,5
4	11,3	22,8	18,5	22,5	8,3	19,3	15,5	13,5
5	14,9	23,3	18,5	20,9	8,5	19,2	16,1	13,2
6	12,4	23,6	18,1	21,5	8,4	19,4	13,8	13,7
7	12,7	23,9	19,0	22,1	8,8	19,1	14,2	13,8
8	12,4	24,4	18,0	23,1	8,8	18,8	15,8	14,9
9	13,3	25,5	18,4	22,7	8,9	19,7	15,7	13,6
10	14,0	24,1	18,2	22,5	8,1	19,2	15,2	13,5
11	12,2	23,6	18,7	22,7	8,7	19,4	16,6	13,3
12	12,9	25,0	18,5	22,4	8,4	19,3	16,7	13,5
13	11,7	22,7	18,1	22,9	8,3	19,0	16,3	14,5
14	13,0	23,0	17,7	21,1	8,6	18,7	16,0	13,1
15	13,2	22,3	17,9	22,2	8,9	19,8	16,3	14,0
16	11,9	23,8	18,0	23,6	9,0	19,1	15,2	14,3
17	12,4	23,4	18,6	22,4	8,7	18,6	16,6	13,6
18	12,9	23,8	18,6	22,8	8,7	18,2	14,2	13,5
19	14,2	24,6	18,6	22,8	8,6	19,3	16,3	13,9
20	14,0	23,0	18,5	20,9	8,5	19,2	14,9	13,9
21	13,9	23,4	19,3	22,1	8,8	18,4	15,9	13,4
22	14,5	25,2	19,0	22,5	8,5	19,8	15,5	14,2
23	12,7	24,3	18,4	20,8	8,9	18,8	16,7	13,8
24	11,2	24,2	18,7	21,3	8,6	18,9	14,5	14,3
25	11,6	24,5	18,9	22,0	8,7	18,5	16,5	13,5
26	13,4	24,4	18,9	21,9	8,4	17,3	16,3	13,8
27	12,0	23,3	18,0	23,0	8,8	17,6	16,5	13,9
28	12,8	24,6	18,2	22,5	8,7	18,2	17,4	13,7
29	14,1	24,0	18,5	22,6	8,9	18,0	16,9	13,6
30	12,5	23,7	18,9	22,4	8,6	19,3	15,5	13,6

Среднее значение, мм	12,9	23,9	18,5	22,1	8,6	18,9	15,7	13,7
Дисперсия	0,96	0,55	0,14	0,62	0,05	0,35	1,05	0,15
Критерий G_{\max} по 4 выборкам	0,42				0,66			
Критерий Граббса \max \min	0,76 1,09				0,88 1,06			

Рассчитанное значение критерия Кохрена в случае использования разработанного портативного устройства составляет 0,42, что ниже критического значения для имеющегося количества выборок данного размера ($G_{\text{таб}}=0,4366$), это говорит об однородности полученных результатов. Измерения по методике ГОСТ Р 59637-2021 по значению критерия Кохрена не укладываются в условие однородности, но полученное значение критерия не на много превышает табличное. По полученным результатам можно сделать вывод, что измерения высоты пенококса по новой методике отличаются однородностью. Анализируя значения критерия Граббса, который в обоих случаях, как по минимальному среднему арифметическому значению высоты пенококса для четырех образцов ОВП, так и по максимальному, не превышает установленное табличное значение 1,481 (при уровне значимости 0,05), можно сказать, что в обоих случаях результаты измерения не содержат грубых выбросов и могут считаться достоверными. Таким образом, методика исследования огнезащитной эффективности с помощью разработанного портативного устройства позволяет проводить достоверное измерение высоты слоя пенококса для данного типа ОВП толщиной 0,7-1,5 мм. Учитывая, что в случае применения разработанного портативного устройства значения высоты слоя пенококса во всех случаях превышают результаты использования методики ГОСТ Р 59637-2021, при оценке огнезащитной эффективности к параметру коэффициента вспучивания необходимо предъявлять более жесткие требования.

Заключение

В ходе исследования была рассмотрена актуальная проблема обеспечения пожарной безопасности металлоконструкций с применением вспучивающихся огнезащитных покрытий. Предложен новый перспективный метод оценки качества покрытий, основанный на принципе электромагнитной индукции и двустороннего прогрева. Его ключевые преимущества:

- отсутствие необходимости использования открытого пламени;
- создание температурного режима, достаточного для полного (на всю глубину) вспучивания покрытия;
- минимизация отвода тепла через металлическую конструкцию за счёт локального индукционного прогрева.

В результате проведённых исследований пяти образцов ОВП, отобранных с реальных объектов, по двум методикам: новой на основе применения портативного устройства и описанной в ГОСТ Р 59637-2021, были достигнуты следующие результаты:

1. Подтверждена работоспособность разработанного устройства и возможность получения с его помощью достоверных данных о коэффициенте вспучивания ОВП толщиной $1,0 \pm 0,3$ мм на основе акрилового сополимера;
2. Проведена оценка качества получаемых по новой методике результатов с помощью статистического анализа, которая показала высокую однородность получаемых данных и отсутствие грубых ошибок, на уровне сопоставимом (и даже превышающем) результаты, получаемые по методике в ГОСТ Р 59637-2021.

Практическое значение исследования заключается в создании инструмента, позволяющего оперативно оценивать качество вспучивающихся покрытий в полевых условиях и снизить риски применения неэффективных материалов при огнезащите металлоконструкций. Перспективы дальнейшей работы включают оптимизацию параметров устройства (мощность, габариты, удобство использования), расширение диапазона тестируемых толщин покрытий, разработку методических рекомендаций для практического применения технологии. Таким образом, предложенный новый метод открывает возможности для повышения надёжности огнезащиты металлоконструкций и может стать важным элементом системы пожарной безопасности.

Список источников

1. Шебеко, Ю.Н. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара / Ю.Н. Шебеко, А.В. Зубань, А.Ю. Шебеко // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28, № 6. – С. 29-34. – DOI 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34. – EDN OQRJET.
2. Пронин Д.Г. Пособие «Огнестойкость стальных несущих конструкций» / Ассоциация развития стального строительства. – Москва: АКЦИОМ ГРАФИКС ЮНИОН, 2015. – 52 с.
3. Павлович, А.В. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия / А.В. Павлович, А.С. Дринберг, Л.Н. Машляковский. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "ЛКМ-пресс", 2018. – 488 с. – ISBN 978-5-906271-05-1. – EDN WVOIPP.
4. Intumescent coating and fire protection of steel structures / Guo-Qiang Li, Ling-Ling Wang, Qing Xu, Jun-Wei Ge. First edition. | Boca Raton: CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003287919.
5. Цыганков, М.С. Разработка полевого метода исследования вспучивающихся огнезащитных покрытий / М. С. Цыганков // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2025. – № 2. – С. 134-141. – DOI 10.61260/2218-130X-2025-2-134-141. – EDN YLECHN.
6. Бельшина, Ю.Н. Моделирование теплообмена в переносном устройстве прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий / Ю.Н. Бельшина, М.С. Цыганков, Л.Н. Ян // Техносферная безопасность. – 2025. – № 2(47). – С. 38-46. – EDN UQJRXQ.
7. Патент № 2814877 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/02, C09D 5/18, H05B 6/02. Способ двустороннего высокотемпературного прогрева тонкослойных лакокрасочных покрытий (интумесцентных красок огнезащитного типа): № 2023116726: заявл. 23.06.2023: опубл. 05.03.2024 / М. С. Цыганков. – EDN OAKJPY.
8. ГОСТ Р 59637-2021 Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 40 с.
9. Кросс А. Введение в практическую инфракрасную спектроскопию. М.: Изд-во иностранной лит., 1961. 110 с.
10. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностранной лит., 1963. 590 с.
11. James M. Thompson - Infrared Spectroscopy (2018, Pan Stanford) ISBN 978-981-4774-78-9 (Hardback). – 2018 – pp. 211.
12. Исследование процессов термической деструкции огнезащитных вспучивающихся составов методом инфракрасной спектроскопии / М.Ю. Принцева, И.В. Клаптюк, Т.Д. Теплякова // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2024. № 2. С. 1-10.
13. Деффель К. Статистика в аналитической химии. пер с нем. М.: Мир, 1994. 268 с.

References

1. Shebeko, Yu.N. Calculation of the actual fire resistance limit of unprotected steel structures under various temperature conditions of fire / Yu.N. Shebeko, A.V. Zuban, A.Yu. Shebeko // Fire and

explosion safety. – 2019. – Vol. 28, No. 6. – pp. 29-34. – DOI 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34. – EDN OQPJET.

2. Pronin D.G. Manual "Fire resistance of steel bearing structures" / Association for the Development of steel construction. Moscow: AXIOM GRAPHICS UNION, 2015. 52 p.

3. Pavlovich, A.V. Flame-retardant bulging paint and varnish coatings / A.V. Pavlovich, A.S. Drinberg, L. N. Mashlyakovskiy. – Moscow: Limited Liability Company, LKM-Press Publishing House, 2018. – 488 p. – ISBN 978-5-906271-05-1. – EDN WVOIPP.

4. Intumescent coating and fire protection of steel structures / Guo-Qiang Li, Ling-Ling Wang, Qing Xu, Jun-Wei Ge. First edition. | Boca Raton: CRC Press, 2023. DOI: 10.1201/9781003287919.

5. Tsygankov, M.S. Development of a field method for the study of bulging flame-retardant coatings / M. S. Tsygankov // Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". – 2025. – No. 2. – pp. 134-141. – DOI 10.61260/2218-130X-2025-2-134-141. – EDN YLECHN.

6. Belshina, Yu. N. Modeling of heat transfer in a portable device for heating intumescent flame-retardant coatings / Yu. N. Belshina, M. S. Tsygankov, L. N. Yan // Technosphere safety. – 2025. – № 2(47). – Pp. 38-46. – EDN UQJRXQ.

7. Patent No. 2814877 C1 Russian Federation, IPC G01N 25/02, C09D 5/18, H05B 6/02. Method of double-sided high-temperature heating of thin-layer paint coatings (intumescent paints of flame-retardant type): No. 2023116726: application 23.06.2023: published 05.03.2024 / M. S. Tsygankov. - EDN OAKJPY.

8. GOST R 59637-2021 Fire protection equipment for buildings and structures. Fire protection products. Methods of quality control of fire-retardant works during installation (application), maintenance and repair. – Moscow: Standartinform, 2021. – 40 p.

9. Cross A. Introduction to practical infrared spectroscopy. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1961. 110 p.

10. Bellamy L. Infrared spectra of complex molecules. Moscow: Publishing House of foreign literature, 1963. 590 p.

11. James M. Thompson - Infrared Spectroscopy (2018, Pan Stanford) ISBN 978-981-4774-78-9 (Hardback). – 2018 – pp. 211.

12. Investigation of the processes of thermal destruction of flame-retardant bulging compounds by infrared spectroscopy / M.Y. Printseva, I.V. Klapyuk, T.D. Teplyakova // Scientific and analytical journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". 2024. No. 2. pp. 1-10.

13. Deffel K. Statistics in analytical chemistry. Translated from German. Moscow: Mir, 1994. 268 p.

Информация об авторах

Ю.Н. Бельшина - канд. техн. наук, доцент

В.А. Ломан - кандидат технических наук

Information about authors

A Yulia N. Belshina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Valentin A. Loman - Candidate of Technical Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025, одобрена после рецензирования 15.12.2025, принята к публикации 19.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025, approved after reviewing 15.12.2025, accepted for publication 19.12.2025.