

На правах рукописи



Мартынов Алексей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ
ИНТУМЕСЦЕНТНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЗАЩИТЫ**

2.10.1. Пожарная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Иваново – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет» на кафедре «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды».

Научный руководитель

Попова Ольга Васильевна

доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты

Гаращенко Анатолий Никитович

доктор технических наук, доцент,
АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», начальник отдела

Гравит Марина Викторовна

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», высшая школа
промышленно-гражданского и дорожного
строительства, доцент

Ведущая организация

Уральский институт ГПС МЧС России

Защита состоится 18 июня 2026 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 04.2.005.02 на базе Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по адресу: 153040, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33, ауд. 1101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России: <https://www.edufire37.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 04.2.005.02,
кандидат технических наук, доцент

Колбашов Михаил Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Повышение огнестойкости строительных конструкций зданий и сооружений с помощью интумесцентных огнезащитных покрытий широко применяется на объектах строительства. Важными проблемами при этом являются контроль качества огнезащитных покрытий непосредственно после нанесения и в процессе эксплуатации, в том числе в рамках реализации надзорной деятельности.

В последние годы объёмы использования интумесцентных красок как эффективных средств огнезащиты значительно возросли, однако на рынке присутствует контрафактная и некачественная продукция, в том числе не соответствующая сертификатам производителей. При этом подготовка материала и нанесение его в условиях строительной площадки контролируется зачастую только самим производителем работ.

Согласно требованиям СП 2.13130.2020 (с изменениями 2023 г.) (п. 5.4.3) в технической документации на средства огнезащиты и в проекте огнезащиты должен быть указан порядок контроля огнезащитной эффективности покрытия в процессе его эксплуатации. Эксплуатация покрытия осуществляется на поверхности объекта защиты, однако существующие сегодня методы диагностики параметров нанесённых покрытий не позволяют произвести проверку их огнезащитной эффективности непосредственно на объекте.

Следовательно, совершенствование методики контроля параметров интумесцентных ОЗП и разработка методики экспресс-анализа, позволяющей определять параметры пенококса, выявлять эффективность интумесцентной огнезащиты стальных конструкций непосредственно на объекте защиты, а также прогнозировать сроки службы ОЗП, являются актуальной проблемой.

Степень разработанности темы. Основой для диссертационного исследования стали результаты публикаций научных школ, занимающихся разработкой, испытанием интумесцентных материалов, исследованием их свойств и огнезащитного механизма: Института синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН (Халтуринский Н.А., Васин В.П., Рудакова Т.А. и др.), Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Берлин А.А., Решетников И.С. и др.), Института химических наук им. А.Б. Бектурова АН Республики Казахстан (Гибов К.М. и др.); Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Гравит М.В.), Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России (Зыбина О.А.), АО «Центральный НИИ специального машиностроения» (Гаращенко А.Н. и др.), ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Смирнов Н.В. и др.), Университета Квинсленда в Австралии (Lucherini A., Maluk S.), Федерального института исследований и испытания материалов в Германии (Morys M.) и др. Анализ научных публикаций показал, что физико-механические свойства пенококса исследованы недостаточно. Информация о разработке специальных приборов и устройств для оценки огнезащитной эффективности интумесцентных покрытий, а именно величины адгезии и механических свойств пенококса в условиях объекта защиты, в научной литературе практически отсутствует, что подтверждает актуальность выбранной темы исследования.

Цель и задачи исследования. Совершенствование методики контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий металлических конструкций для применения непосредственно на объектах защиты в процессе строительства и эксплуатации, в том числе разработка системы показателей качества, мероприятий и средств по их обеспечению.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-исследовательские и практические задачи:

- 1) анализ и исследование методов оценки эффективности интумесцентных покрытий, влияния параметров интумесцентной краски и пенококка на обеспечение требуемой эффективности огнезащитного покрытия и основных причин несоответствия техническим характеристикам огнезащитного интумесцентного покрытия до и после огневого воздействия;
- 2) выбор и разработка системы показателей качества, мероприятий и средств по её обеспечению, методов определения параметров пенококка непосредственно на объекте защиты; разработка принципиальных схем приборов для измерения характеристик пенококка;
- 3) исследование физико-механических свойств пенококка с применением новых методов, установление зависимости параметров пенококка от состава и технологических условий формирования интумесцентного покрытия;
- 4) разработка технических требований к комплекту средств измерений для контроля параметров пенококка на объекте защиты;
- 5) проверка и обоснование эффективности применения методики контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий непосредственно на объектах защиты.

Научная новизна:

1. Научно обоснована система показателей качества огнезащитного покрытия, мероприятий и средств по её обеспечению, обязательных для контроля непосредственно на объекте защиты.

2. Получены новые данные и исследованы зависимости параметров пенококка: коэффициента вспучивания и плотности от степени разбавления интумесцентной краски и толщины покрытий, а также механических характеристик пенококка (силы внедрения индентора и силы сдвига) от коэффициента вспучивания и его плотности.

3. Впервые разработаны метод измерения прочности пенококка на сжатие и метод измерения величины адгезии пенококка (прочности пенококка на сдвиг).

4. Впервые разработана и реализована на практике методика контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий непосредственно на объекте защиты с определением их основных физико-механических свойств.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Впервые предложена система показателей качества огнезащитного покрытия, необходимых для оценки на объекте защиты (коэффициента вспучивания, плотности, силы сдвига пенококка, силы внедрения индентора в пенококк) и исследованы закономерности влияния на эти параметры степени разбавления интумесцентной краски и толщины покрытий.

2. Обоснована важность контроля предложенного комплекса физико-механических свойств пенококка, непосредственно влияющих на огнезащитную эффективность интумесцентного покрытия, не рассматриваемого как связанный

комплекс в научно-технической литературе и не регламентированного в нормативных документах.

3. Разработано оригинальное устройство (огневая коробка), реализующее физический процесс вспучивания покрытий при термическом воздействии в локальной зоне на реальном объекте, позволяющее обеспечить параметры процесса нагрева, приближенные к реальным условиям пожара.

4. Предложен инструментально-приборный комплекс для реализации методики контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий на объекте защиты, также созданы оригинальные конструкции приборов для измерения прочности пенококса на сжатие и на сдвиг, разработаны технические требования к нему.

5. Проведена верификация предложенной методики и подтверждена эффективность разработанных приборов на реальных объектах, поднадзорных МЧС России.

Методология и методы исследований. При выполнении работы был применен комплекс общелогических и теоретических методов научных исследований на стадии обработки и накопления информации; экспериментальные методы исследования физических, физико-механических свойств и структуры огнезащитного покрытия (определения прочности, огнезащитной эффективности, микроструктурного анализа); методы математической статистики (планирования эксперимента, регрессионного и дисперсионного анализа).

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная система показателей качества, мероприятий и средств по её обеспечению и методика контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий непосредственно на объекте защиты.

2. Результаты анализа причин несоответствующего качества интумесцентной огнезащиты и обоснования необходимости разработки новых методов оценки качества интумесцентных покрытий.

3. Результаты исследования физико-механических свойств огнезащитного покрытия и установления комплекса показателей качества пенококса, обязательных для контроля на объекте защиты.

4. Результаты разработки новых методов оценки качества огнезащитных покрытий на объекте защиты.

4. Принципиальные решения по комплексу средств измерений для контроля параметров огнезащитных покрытий в условиях объекта защиты.

5. Результаты обоснования эффективности применения разработанных методов и инструментально-приборного комплекса для контроля параметров при испытаниях интумесцентных покрытий на огнезащитную эффективность.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов основывается на большом объеме проведенных экспериментов, подтверждается практической проверкой предложенных гипотез и технических решений, согласованностью теоретических выводов с данными, полученными в результате экспериментальных исследований в реальных условиях эксплуатации объектов исследования с применением современных измерительных средств, методик проведения испытаний и обработки их результатов.

Личный вклад автора состоит в выборе направления, темы и методов исследования, научном анализе и интерпретации результатов эксперимента. Разработка оригинальных методов контроля параметров интумесцентных покрытий

и экспериментальные исследования выполнены автором лично или при его непосредственном участии. Изложенные в диссертации результаты отражают самостоятельные исследования автора и его работы, выполненные в соавторстве.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены на 5-й Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии функциональных материалов» 10–12 октября 2018 года в г. Санкт-Петербург; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк-2019») 24–26 октября 2019 года в г. Ростов-на-Дону; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры» 12 декабря 2019 года в г. Ростов-на-Дону; XV Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной 30-й годовщине МЧС России, 17–18 ноября 2020 года в г. Иваново; IV Всероссийской национальной научно-практической конференции «Теория и практика безопасности и жизнедеятельности» 26–27 марта 2021 года в г. Ростов-на-Дону; II Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической» 13–14 ноября 2024 года в г. Ростов-на-Дону; XX Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвящённой 35-й годовщине со дня образования МЧС России, 13–14 ноября 2025 года в г. Иваново.

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликованы 16 работ, в том числе 5 статей в научных журналах из перечня, рекомендуемого ВАК РФ для защиты по указанной специальности.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, четыре главы с основными положениями, заключение, список используемой литературы из 138 наименований и приложение; изложена на 139 страницах, включает 57 рисунков, 15 таблиц.

Тема диссертационной работы соответствует п. 7 «Разработка и совершенствование методов оценки, диагностики и прогнозирования, направленных на повышение огнестойкости строительных конструкций и объектов защиты» и п. 10 «Разработка научных основ моделей и методов, направленных на создание и применение веществ и материалов пониженной горючести, средств огнезащиты и огнетушащих веществ» паспорта научной специальности 2.10.1. Пожарная безопасность.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и решаемые задачи, обозначена новизна и практическая ценность работы.

В первой главе «Огнезащитные интумесцентные покрытия: анализ научных и практических данных» приводятся результаты изучения литературных источников и нормативной документации с целью выявления аналогичных работ, анализа результатов для уточнения направления работы. Среди наиболее актуальных задач в научных публикациях отмечается необходимость разработки общей методологии испытаний, которая позволит в явном виде количественно оценить огнезащитную эффективность ИП.

Во второй главе «Материалы и методы для исследования» описаны материалы и их подготовка для исследования, применяемые методы исследования. В

качестве материалов использовали огнезащитные составы «Defender M Solvent», «Defender M», «Defender ME» (ООО «Лаборатория «Евростиль», г. Москва) на стирол-акриловом и эпоксидном связующих; модельные краски аналогичного компонентного состава на стирол-акриловом связующем Экоформ 2245 (ООО ПФК «ЭкоКемикал»). Краску наносили на пластины из стали марки Ст3 (ГОСТ 380-94). Сформированные покрытия помещали в муфельную печь и выдерживали до окончания процесса вспучивания, одновременно увеличивая температуру в печи в соответствии с утверждённой температурной кривой (ГОСТ Р 53295-2009). Пластины с образовавшимся ПК после остывания исследовали по утверждённым стандартам и в соответствии с представленными далее новыми методами. Определение коэффициента вспучивания ($K_{всп}$) образцов проводили согласно СП.433.1325800.2019 (СП).

В разделе 2.4 представлены новые методы исследования качества интумесцентной огнезащиты (методы экспресс-анализа).

Метод локального нагрева интумесцентного покрытия в местах отбора проб
 При проведении огневых испытаний непосредственно на объекте защиты применяют портативную газовую горелку мощностью 1 кВт на базе малогабаритного газового баллончика объемом 0,3–0,5 л со сжиженным газом (пропан-бутановая смесь). Для обеспечения заданных размеров пятна нагрева и снижения рассеивания теплоты при обжиге участка ИП разработана огневая коробочка (ОК) с универсальным креплением для фиксации на профильных элементах разной конфигурации (рисунок 1).

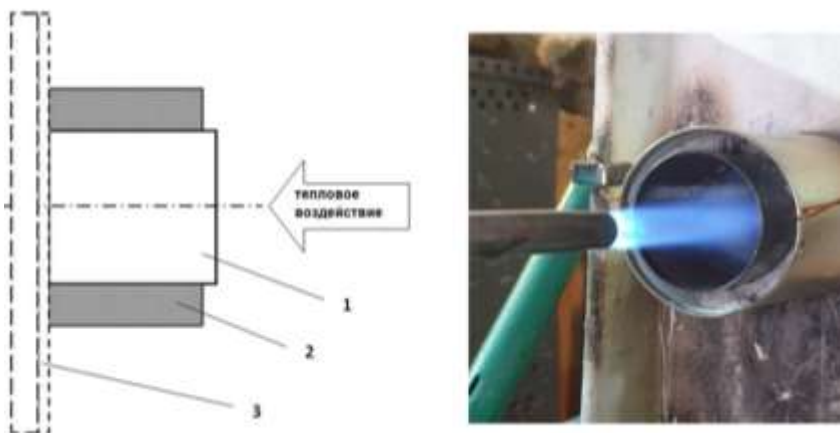


Рисунок 1 – Огневая коробочка

ОК состоит из внутренней огнестойкой ёмкости (1), которая представляет собой полый цилиндр. Одна сторона ОК примыкает к тестируемой поверхности (элементу строительной конструкции с ИП) (3), другая открыта для воздействия огня от нагревателя. Наружная боковая поверхность ОК

защищена теплоизолирующим слоем (2). После обжига производят замеры толщины сформированного ПК и рассчитывают $K_{всп}$ по формуле:

$$K_{всп} = \frac{\delta_1}{\delta_0}, \quad (1)$$

где δ_0 – исходная толщина образца ИП, мм; δ_1 – итоговая толщина образца ПК после нагрева, мм.

Измерения прочности ПК выполняют на установке, которая является аналогом одного из типов пенетрометров. Принцип измерения состоит в приложении силы, значения которой можно наблюдать на микродинамометре, посредством сменного наконечника к образцу сформированного ПК.

Метод экспресс-анализа прочности ПК на сжатие и на сдвиг

Для определения силы внедрения индентора на защищаемой поверхности (1) над слоем ПК (2) устанавливают приспособление (3), на котором закреплён микродинамометр (4) со сменным индентором (5) (рисунок 2). Направление движения штока индентора – по нормали к поверхности покрытия.

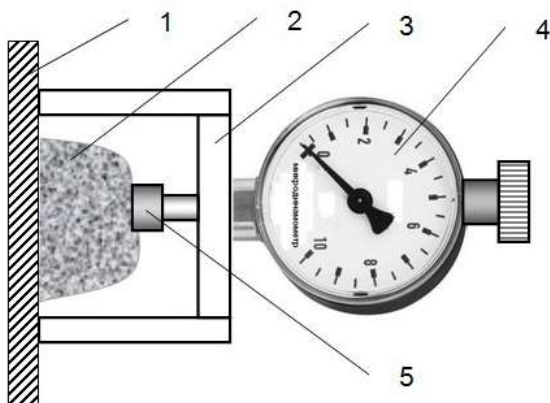


Рисунок 2 – Схема устройства для измерения силы внедрения индентора

Далее проводят измерение, фиксируют результат и рассчитывают предел прочности путём деления измеренного значения силы на площадь рабочей поверхности индентора.

Для измерения величины условной адгезии ПК (силы сдвига ПК) (рисунок 3) прибор закрепляют посредством узла (5) на защищаемой конструкции (1) параллельно поверхности с ИП (2), на которой сформирован участок с ПК (3), на расстоянии от поверхности металла примерно 3–5 мм. При движении штока с упором (4) параллельно поверхности покрытия происходит вдавливание упора в

ПК до момента его отрыва или его частичного разрушения. Силу в момент отрыва или разрушения без отрыва массива ПК (что отмечается в протоколе испытаний) фиксируют микродинамометром (6). При условии точного определения площади зоны отрыва или разрушения рассчитывают предел прочности ПК на сдвиг.

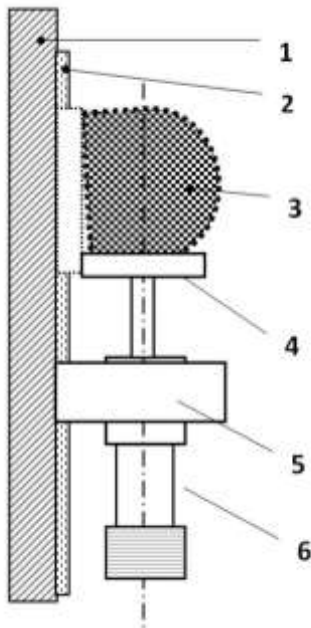


Рисунок 3 – Схема устройства для измерения силы сдвига

Приборы крепятся на рёбрах элементов строительной конструкции посредством зажимов типа струбцин или сильными магнитами (если возможно), которые являются сменными, с зажимами. Для микродинамометра предпочтительна цифровая фиксация данных по схеме «сила – перемещение». Испытаны инденторы из легированной стали двух типов: стержень диаметром 3 мм и квадратный штамп с размерами площадки индентора 12×12 мм. Скорости погружения инденторов – 0,5–1 мм/с. Размерность измеренных величин силы внедрения индентора и силы сдвига – грамм-сила.

В третьей главе «Разработка системы показателей качества методики контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий на объекте защиты» рассмотрены причины нарушений качества интумесцентной огнезащиты (рисунок 4), проблемы методов испытания на огнестойкость ИП, исследованы физико-механические свойства пенококса, приведены результаты анализа структуры пенококса в зависимости от условий его формирования.

Характерными видами брака ОЗП являются следующие: сползание ИП во время формирования ПК; неравномерная структура ПК с крупными газовыми

полостями; отсутствие вспучивания ИП с образованием пористой структуры ПК; непрочная структура ПК со слабой адгезией к защищаемой поверхности.



Рисунок 4 – Причины нарушения качества интумесцентной огнезащиты

При исследовании параметров огнезащитного покрытия для разных составов интумесцентной краски с разной толщиной исходных слоев наблюдали уменьшение $K_{всп}$ при увеличении толщины слоя краски (рисунок 5). При увеличении толщины слоя одной и той же краски высота сформировавшегося ПК остаётся приблизительно одинаковой, то есть, увеличивается его плотность.

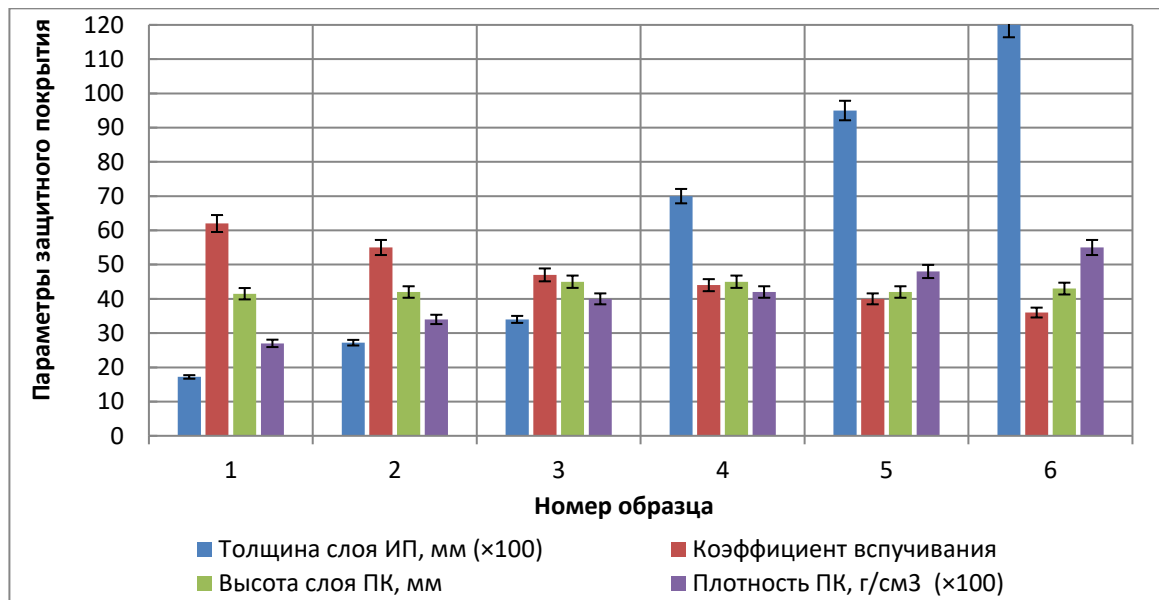


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента вспучивания и высоты слоя ПК от толщины слоя краски «Defender M Solvent»

Из вышесказанного следует, что критерий вспучиваемости ПК нельзя считать достаточным параметром, определяющим свойства огнезащитного покрытия.

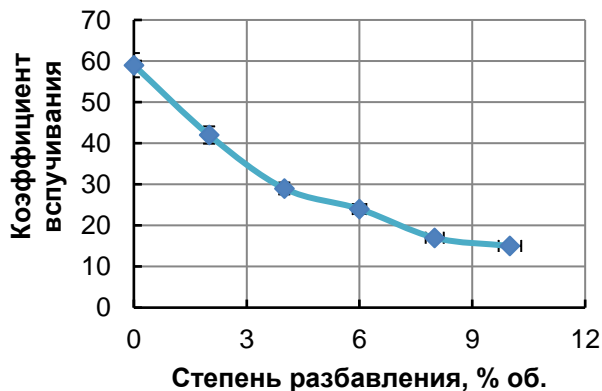


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента вспучивания от объемной доли разбавителя в исходной краске «Defender M Solvent»

Серьезной проблемой является разбавление интумесцентной краски на объекте защиты для облегчения прокачивания краски через насос краскопульты или корректировки вязкости. При введении разбавителя $K_{всп}$ существенно уменьшается (рисунок 6). При огневом испытании такого покрытия ПК получается низкого качества или же вспучивание не происходит вообще, а образуется тонкий обугленный слой, иногда сильно растекающийся и совершенно не обеспечивающий огнезащиту (рисунок 7).



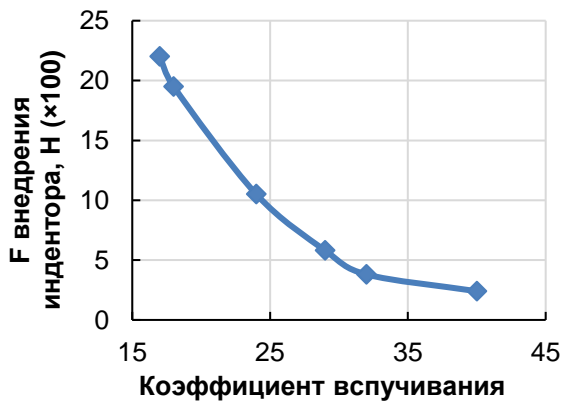
Рисунок 7 – Влияние избыточного разбавления на свойства ПК (справа модельный состав краски + 10% разбавителя, слева краска «Defender M solvent» + 10% ортоксилола)

Итак, на характеристики интумесцентной огнезащиты существенно влияют толщина слоя краски и степень ее разбавления перед нанесением покрытия. Нарушение этих параметров невозможно выявить по современным стандартам, осматривая внешний вид ИП, измеряя его толщину и величину условной адгезии.

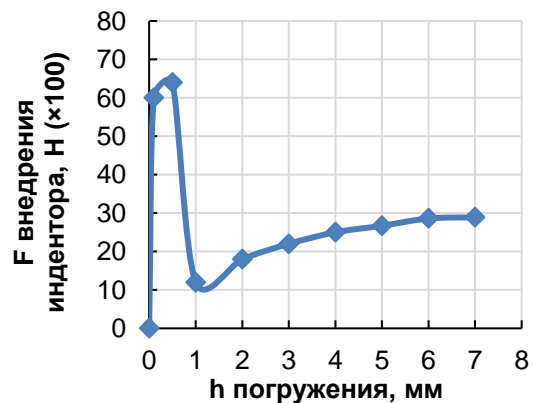
Для оценки прочности ПК на сжатие проведена серия опытов:

- с постоянной глубиной погружения h для измерения усилия пенетрации (внедрения индентора) F (рисунок 8, а);
- с постоянной скоростью погружения (при этом регистрировали усилие внедрения индентора F в зависимости от глубины погружения h) (рисунок 8, б). ПК на большей части поверхности имеет тонкую твердую оболочку (корку). При разрушении этой оболочки регистрируется скачок величины силы внедрения индентора, из-за чего сравнение результатов измерений для разных образцов усложняется. Поэтому измерения силы внедрения индентора в ПК проводили на заданной глубине (5 мм) от поверхности корки (рисунок 8, а).

Вначале пенетрации происходит резкое увеличение показателя силы внедрения индентора, после чего следует такое же резкое его уменьшение после «проламывания» корки ПК (рисунок 8, б). Далее при погружении индентора усилие снова растет, что свидетельствует об уплотнении ПК в нижних слоях.



а



б

Рисунок 8 – Зависимость силы внедрения индентора: а – от коэффициента вспучивания при глубине погружения индентора 5 мм; б – от глубины погружения индентора в слой ПК

При оценке прочности ПК на сдвиг замечено, что в большинстве случаев под слоем непосредственно ПК имеется переходный слой, состоящий из невыработанных компонентов интумесцентной краски. Этот слой имеет повышенную твёрдость и скрепляет слой полностью сформированного ПК с субстратом. При определённых усилиях ПК отрывается не от субстрата, а от переходного слоя. Если же компоненты краски были полностью трансформированы в ПК, то он отрывается чрезвычайно легко и такая огнезащита быстро прекращает своё действие. Опыты для оценки силы сдвига были проведены с поправкой на этот слой: шток для обеспечения усилия сдвига (4) (рисунок 3) воздействовал на ПК на расстоянии 2–3 мм от субстрата.

Данные, полученные при измерении силы внедрения индентора и силы сдвига для красок Defender M Solvent 3-х и 5-ти разных партий соответственно, демонстрируют линейное снижение сил, требуемых для внедрения индентора в ПК и сдвига участка ПК при повышении $K_{всп}$ (рисунок 9, рисунок 10).

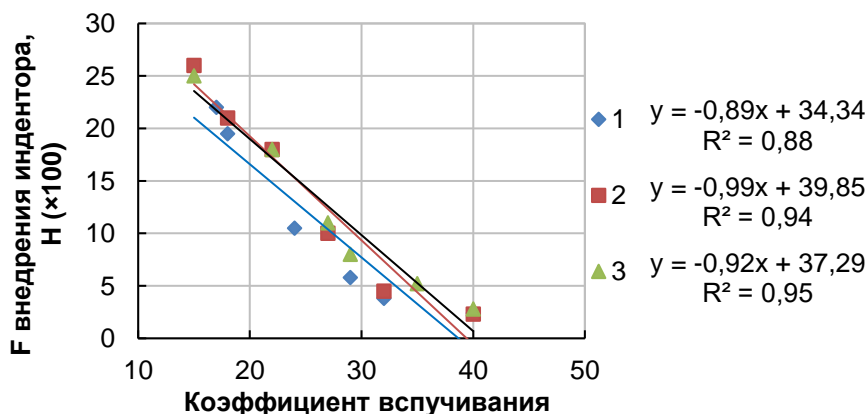


Рисунок 9 – Зависимость силы внедрения индентора в ПК от коэффициента вспучивания ИП Defender M Solvent 3-х разных партий

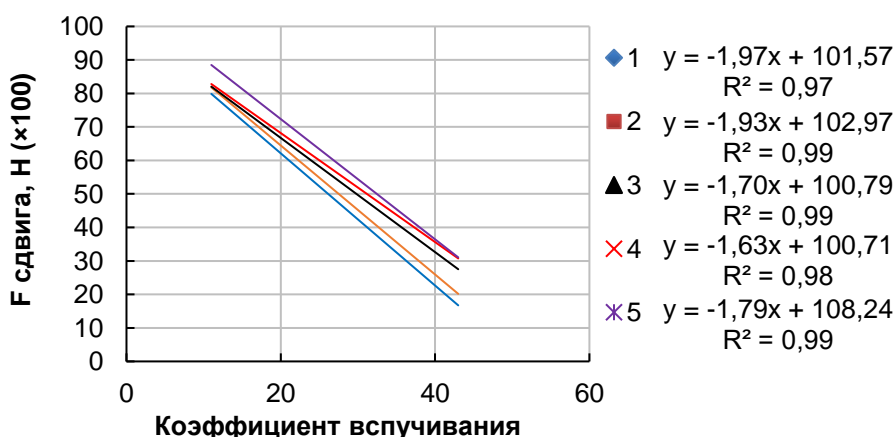


Рисунок 10 – Зависимость силы сдвига ПК от коэффициента вспучивания ИП Defender M Solvent 5-ти разных партий

Для более точной оценки влияния объемной доли разбавителя и толщины наносимого слоя краски на процесс формирования ПК применили расширенную матрицу планирования полного 3-факторного эксперимента по планам первого

порядка. В качестве третьего влияющего фактора приняли фактор времени обжига ПК после достижения температуры 500 °С градусов.

Постоянными условиями эксперимента являлись: состав краски, температурная кривая обжига, защищаемый материал). Факторы варьирования: X_1 – объемная доля разбавителя – 4 об. %; X_2 – толщина слоя краски ~500 мкм (один слой); X_3 – время обжига после достижения +500 °С градусов – 35 мин. Функции отклика: Y – коэффициент вспучивания ПК, Z – сила внедрения индентора в ПК, H . После обработки результатов экспериментов получены уравнения регрессии.

$$Y = 23,9 - 7,3X_1 - 4,1X_2 + 1,6X_3 - 3,4X_1X_2X_3.$$

$$Z = 0,176 - 3,5X_1 - 1,2X_2 + 1,3X_1X_2 - 1,2X_2X_3.$$

Значимость коэффициентов уравнений оценивали по критерию Стьюдента, адекватность уравнений – по критерию Фишера (F). Для функции Y рассчитанное значение F составляет 11,22, табличное значение – 9,12 ($f_1 = 4$, $f_2 = 3$) при уровне значимости 0,05. Для функции Z рассчитанное значение F = 6,09, табличное значение – 5,34 ($f_1 = 4$, $f_2 = 3$) при уровне значимости 0,1. Полученные модели являются адекватными в заданных интервалах величин выбранных факторов при соответствующих пороговых вероятностях ошибки.

Таким образом, формированию ПК с высоким $K_{всп}$ способствуют уменьшение содержания разбавителя в интумесцентной краске, толщины слоя краски и увеличение времени обжига ПК после его формирования. Прочность ПК при сжатии в основном определяется двумя из исследованных в системе факторов – объемной долей разбавителя и толщиной слоя краски. Наибольшее влияние на $K_{всп}$ и прочность оказывает доля разбавителя, меньшее – толщина слоя краски.

В четвертой главе «Технические средства и обоснование эффективности методики контроля параметров интумесцентной огнезащиты на объекте защиты» приведены технические условия контроля параметров ИП и комплект средств измерений, порядок применения разработанной методики, условия и результаты сравнительных испытаний огнезащитной эффективности.

Для контроля качества огнезащитных свойств ИП на защищаемой конструкции предложен комплект средств измерений (таблица 1).

Таблица 1 – Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной огнезащиты

Оборудование	Ориентировочные параметры	Примечание
Огневая коробка с универсальными креплениями	Размеры области огневого воздействия: не более Ø 100 мм	Собственная разработка (рисунок 1)
Источник пламени – газовый баллон объемом 0,3–0,5 л с горелкой	Обеспечение температуры не более +600 °С градусов в течение 45 мин с перерывами	ТУ и спецификации изготовителей
Измеритель температуры нагреваемой поверхности	Пирометр или контактный термометр с пределом измерения до 1000 °С градусов	ТУ и спецификации изготовителей
Штангенциркуль или штангенглубиномер	Измерение высоты слоя пенококса в пределах 0–100 мм	ГОСТ 166-89 (штангенциркули),

		ГОСТ 162-90 (штангенглубиномеры)
Микродинамометр на установочной рамке с креплениями для измерения силы внедрения индентора в ПК	Измерение силы внедрения индентора с пределом измерений до 500–750 г; диапазон перемещения штока не менее 50 мм	Собственная разработка (рисунок 2)
Микродинамометр на установочной рамке с креплениями для измерения силы сдвига ПК	Измерение силы сдвига с пределом измерений до 500–750 г; диапазон перемещения штока не менее 50 мм	Собственная разработка (рисунок 3)

Для осуществления экспресс-анализа разработан перечень последовательных технологических операций в соответствии с СП 433.1325800.2019, ГОСТ Р 53295-2009, ГОСТ 31149-2014, ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75).

Огнезащитную эффективность интумесцентных покрытий определяли методом экспресс-анализа (по показателям: коэффициент вспучивания, прочность пенококса на сжатие и на сдвиг приграничного слоя, плотность пенококса) и стандартными методами согласно требованиям ГОСТ 30247.0-94 (ISO 834-75) (по показателям «время достижения критической температуры» и «критический прогиб при нагревании») (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты испытаний интумесцентной огнезащиты по методикам экспресс-анализа и ГОСТ Р 53295-2009

Параметр	ОЗС 1	ОЗС 2	ОЗС 3
Количество разбавителя в краске, об. %	0	6	10
Время достижения критической температуры подложки (+500 °С), мин.	47	34	27
Коэффициент вспучивания ОЗП	46	17	11
Сила внедрения индентора в ПК вне газовых пузырей, при инденторе диаметром 3 мм, Н	0,059	0,137	0,266
Контактное напряжение на поверхности индентора (локальный предел прочности на сжатие ПК), Н/м ²	8351	19391	37650
Предел прочности на сдвиг приграничного слоя ПК от подложки, Н/м ²	2858	3811	5308
Плотность ПК вне крупных газовых пузырей, г/см ³	0,28	0,44	0,51
Плотность ПК с учётом крупных газовых пузырей, г/см ³	0,28	0,14	0,45

Для испытаний применяли 3 различных варианта интумесцентной краски: Defender M Solvent с параметрами, соответствующими технической документации на состав (ОЗС 1); ОЗС 1 + 6 об. % ортоксилола (ОЗС 2); ОЗС 1 + 10 об. % ортоксилола (ОЗС 3). Защищаемые конструкции: двутавры горячекатаные с параллельными полками №20 (ГОСТ Р 57837-2017) с толщиной слоя готового

красочного покрытия после сушки 0,78–0,82 мм; балки сортамента 35Ш1 длиной 4,2 м с тонкослойным огнезащитным покрытием толщиной 0,87 мм.

По результатам испытаний на огнестойкость по параметрам стандартных методов «время достижения критической температуры» и «критический прогиб при нагревании» при заданном критическом значении прогиба 200 мм потеря несущей способности у образца ОЗС 1 наблюдалась через 47 мин, у образца ОЗС 2 – через 34 мин, у образца ОЗС 3 – через 27 мин (таблица 2).

Разбавление интумесцентной краски сверх нормы приводит к ухудшению параметров огнезащиты и недостижению предела огнестойкости R 45. Чем больше время нагрева стальной подложки образца до критической температуры, тем выше показатель $K_{всп}$ защитного слоя ПК и ниже показатели его прочности (таблица 2).

На основании полученных результатов можно утверждать, что оценка параметров ПК по методике экспресс-анализа в условиях строительного объекта позволяет сделать предварительное заключение о допустимости эксплуатации объекта защиты с нанесённым огнезащитным составом и может стать дополнением к методическим указаниям для работников ИПЛ МЧС России, СП 433.1325800.2019, ГОСТ Р 59637-2021, дополнением к требованиям п. 5.4.3 СП 2.13130.2020 в редакции 2023 г.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Установлены наиболее распространенные причины, ведущие к снижению качества огнезащитного покрытия на базе интумесцентных красок: нарушения при производстве компонентного состава и при разбавлении готовой краски непосредственно перед ее нанесением. Данные нарушения влияют на параметры пенококса – толщину слоя и плотность, их невозможно выявить при внешнем осмотре покрытия, измерении его толщины и величины условной адгезии с использованием существующих стандартов. Методики оценки качества огнезащитных покрытий, принятые в РФ, в частности СП 433.1325800.2019, не обеспечивают объективный контроль качества покрытия в реальных условиях эксплуатации.

2. Показано, что разбавление интумесцентной краски перед применением значительно снижает коэффициент вспучивания: более чем в 2 раза при содержании разбавителя в краске 8–10 об. %. При увеличении толщины слоя краски величина коэффициента вспучивания уменьшается, а толщина сформировавшегося слоя ПК при этом практически не изменяется, то есть увеличивается его плотность. Обосновано, что критерий вспучиваемости не является достаточным параметром, определяющим свойства огнезащитного покрытия.

3. Предложена система показателей качества как основа методики контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий на объекте защиты:

- коэффициент вспучивания;
- сила внедрения индентора в ПК / локальный предел прочности ПК на сжатие;
- сила сдвига ПК / предел прочности ПК на сдвиг,
- однородность структуры ПК на срезе.

4. Разработан метод локального нагрева интумесцентного покрытия в местах отбора проб на объекте защиты, для реализации которого разработано оригинальное устройство – огневая коробка. Показана эффективность метода пенетрометрии для определения прочности ПК, разработаны схемы оригинальных устройств для измерения прочности пенококса на сжатие и на сдвиг непосредственно на объекте защиты. Методы просты и не требуют дорогостоящего оборудования.

5. Посредством применения разработанных методов выявлена зависимость физико-механических свойств ПК от его плотности, которая, в свою очередь, определяется коэффициентом вспучивания. Установлено, что высокие значения коэффициента вспучивания не гарантируют надёжность огнезащиты. Чем выше коэффициент вспучивания, тем ниже плотность и прочность ПК. Так, увеличение коэффициента вспучивания в 1,5 раза приводит к снижению силы сдвига в 1,5...1,7 раза, сила внедрения индентора в ПК при этом уменьшается в 2,2...3,7 раз, что в большей степени проявляется при значениях коэффициента вспучивания менее 30.

6. Разработан и реализован на практике инструментально-приборный комплекс, который дает возможность проводить оценку огнезащитного покрытия непосредственно на объекте защиты по параметрам системы показателей качества. Разработаны технические условия контроля параметров огнезащитного покрытия.

7. Проведена верификация разработанной методики в условиях реальных объектов, которая подтвердила результативность её применения и корректность результатов оценки качества интумесцентной огнезащиты при сопоставлении с результатами применения стандартной методики (ГОСТ 30247.0-94).

Список публикаций автора по теме диссертационной работы

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ:

1. Мартынов А. В., Попова О. В. Методика определения кратности, прочности и адгезии защитного покрытия, выполненного на основе сформированного пенококса // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 9. С. 66–73.

2. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Огнестойкость строительного элемента с интумесцентной огнезащитой: стандартная оценка и экспресс-анализ // Безопасность техногенных и природных систем. 2023. Т. 7. № 2. С. 38–46.

3. Мартынов А. В., Попова О. В., Греков В. В. Нестандартные методы оценки качества интумесцентных покрытий // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 15–20.

4. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной огнезащиты на строительном объекте // Пожары и ЧС. 2021. № 3. С. 61–68.

5. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Некоторые причины нарушения качества интумесцентных покрытий // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 11. С. 69–75.

Публикации в других научных изданиях:

6. Разработка лабораторных методов оценки эксплуатационных показателей интумесцентных покрытий / И. А. Виролайнен [и др.] // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 48(74). С. 130–133 (по результатам 5-й Международной научно-технической

конференции «Наукоёмкие технологии функциональных материалов», 10–12 октября 2018 года, г. Санкт-Петербург).

7. Мартынов А. В., Греков В. В. Тонкослойная огнезащита металлоконструкций // Наука и Мир. 2019. Т. 2. № 3(67). С. 19–22.

8. Мартынов А. В., Греков В. В. К вопросу о материальном балансе пенококса // Наука и Мир. 2019. Т. 2. № 5(69). С. 51–53.

9. Мартынов А. В., Греков В. В. Особенности моделирования процесса образования пенококса // Наука и Мир. 2019. Т. 1. № 6(70). С. 50–52.

10. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. О проблемах качества и надежности интумесцентных покрытий строительных конструкций // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России «ТрансПромЭк-2019»: сб. науч. трудов международной науч.-практ. конф. Т. 1. Технические и естественные науки, Ростов-на-Дону, 24–26 октября 2019 года. Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2019. С. 104–108.

11. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Тонкослойная огнезащита металлоконструкций // Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры: сб. науч. трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции. Т. 1. Ростов-на-Дону, 12 декабря 2019 г. Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2019. С. 127–131.

12. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Неявные нарушения качества интумесцентной огнезащиты // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 17–18 ноября 2020 г. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. С. 68–70.

13. Мартынов А. В., Попова О. В., Греков В. В. О реакционной зоне образования пенококса // Труды РГУПС. 2021. № 1(54). С. 45–47 (по результатам IV Всероссийской национальной научно-практической конференции «Теория и практика безопасности жизнедеятельности», 26–27 марта 2021 года, г. Ростов-на-Дону).

14. Мартынов А. В., Попова О. В. Методика экспресс-анализа интумесцентных огнезащитных покрытий на объекте защиты // Обеспечение безопасности: производственной, пожарной, экологической: сб. науч. трудов II Всероссийской (с международным участием) науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 13–14 ноября 2024 г. Ростов н/Д: Донской государственный технический университет, 2024. С. 252–254.

15. Мартынов А. В., Попова О. В. Оценка влияния условий, предшествующих формированию пенококса, на его огнезащитные свойства // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам ХСІХ Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения». № 8(93). М.: Интернаука, 2025. С. 5–12.

16. Мартынов А. В., Попова О. В. Контроль параметров интумесцентных огнезащитных покрытий на объектах защиты // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XX Международной научно-практической конференции, посвящённой 35-й годовщине со дня образования МЧС России, 13–14 ноября 2025 г. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2025. С. 135–140.