

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Донской государственный технический университет»

На правах рукописи



Мартынов Алексей Владимирович

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

2.10.1. Пожарная безопасность

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Попова Ольга Васильевна

Ростов-на-Дону – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ИНТУМЕСЦЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ: АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	10
1.1 Принципы огнезащиты строительных конструкций. Виды огнезащитных покрытий	10
1.2 Интумесцентная огнезащита.....	13
1.3 Испытания интумесцентных покрытий на огнестойкость	19
1.4 Нормативные документы, регламентирующие приемочный контроль качества огнезащитной обработки	27
1.5 Выводы по главе 1	34
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	37
2.1 Подготовка материалов для исследования	37
2.2 Измерение толщины слоя огнезащитного покрытия и образовавшегося пенококка.....	39
2.3 Определение коэффициента вспучивания образцов	40
2.4 Новые методы исследования качества интумесцентной огнезащиты (методы экспресс-анализа).....	41
2.5 Математические методы планирования эксперимента и обработки результатов	51
2.6 Микроанализ структуры пенококка	53
2.7 Выводы по главе 2.....	53
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТУМЕСЦЕНТНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ НА ОБЪЕКТЕ ЗАЩИТЫ	55
3.1 Причины и виды нарушений качества интумесцентной огнезащиты	55
3.2 Проблемы методов испытания на огнестойкость интумесцентных покрытий	62

3.3	Исследование зависимости коэффициента вспучивания пенококса от толщины слоя интумесцентной краски и от объемной доли разбавителя	66
3.4	Обоснование выбора типа индентора для контроля параметров прочности пенококса	73
3.5	Исследование физико-механических свойств пенококса	76
3.6	Анализ структуры пенококса в зависимости от условий его формирования.....	83
3.7	Выводы по главе 3.....	87
ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТУМЕСЦЕНТНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ НА ОБЪЕКТЕ ЗАЩИТЫ.....		
4.1	Технические условия контроля параметров интумесцентной огнезащиты и комплект средств измерений.....	89
4.2	Условия применения методики	92
4.3	Сравнительные испытания огнезащитной эффективности	93
4.4	Выводы по главе 4.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....		
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		
ПРИЛОЖЕНИЕ		

ВВЕДЕНИЕ

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» (Гарашенко А.Н. и др.), ФГБУ ВНИИПО МЧС России (Смирнов Н.В. и др.), Университета Квинсленда в Австралии (Lucherini A., Maluk C.), Федерального института исследований и испытания материалов в Германии (Mogys 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 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 пенококса 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 пенококса непосредственно

на объекте защиты; разработка принципиальных схем приборов для измерения характеристик пенококса;

3) исследование физико-механических свойств пенококса с применением новых методов, установление зависимости параметров пенококса от состава и технологических условий формирования интумесцентного покрытия;

4) разработка технических требований к комплекту средств измерений для контроля параметров пенококса 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 пенококса: коэффициента вспучивания и плотности от степени разбавления интумесцентной краски и толщины покрытий, а также механических характеристик (силы внедрения индентора и силы сдвига) пенококса от коэффициента вспучивания и его плотности.

3. Впервые разработаны метод измерения прочности пенококса на сжатие и метод измерения величины адгезии пенококса (прочности пенококса 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 пенококса, силы внедрения индентора в пенококс) и исследованы закономерности влияния на эти параметры степени разбавления интумесцентной краски и толщины покрытий.

2. Обоснована важность контроля предложенного комплекса физико-механических свойств пенококса, 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.

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

6. 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 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.

ГЛАВА 1 ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ИНТУМЕСЦЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ: АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

1.1 Принципы огнезащиты строительных конструкций.

Виды огнезащитных покрытий

Пожары в зданиях являются причиной множества смертей во всем мире, также они имеют огромные экономические и социальные последствия. Несмотря на кажущуюся небольшую частоту возникновения пожаров на объектах жизнедеятельности, последствия зачастую наносят весьма значительный урон зданиям и сооружениям. В связи с этим имеется необходимость чёткого соблюдения мер пожарной безопасности, что подразумевает, в первую очередь, меры по предупреждению пожара, а также подготовку плана тушения пожара и эвакуации людей. Одним из наиболее важных параметров является обеспечение общей устойчивости и геометрической неизменяемости при пожаре, то есть в основе пожарной безопасности зданий должна быть обеспечена структурная целостность несущих конструкций во время и после пожара [6]. Следовательно, структурную целостность и пространственную устойчивость здания следует рассматривать как ключевой аспект стратегии проектирования огнестойкой конструкции [7].

Стальной прокат, сборный и монолитный железобетон широко применяются как в промышленном, так и гражданском строительстве. Стальные конструкции в основном используются в качестве несущего каркаса, а возможность изготовления элементов зданий и сооружений непосредственно на заводе металлических конструкций позволяет снизить временные и экономические затраты на строительство. Целостность и несущая способность таких конструкций может быть нарушена вследствие пожара. Как железобетон, так и сталь, применяемые в строительстве, имеют ограничения по температуре нагрева при пожаре [8–10] при том, что строительные конструкции могут иметь огромный запас прочности,

обусловленный конструктивными особенностями здания и нагрузками на них [11–13]. В случае превышения температуры конструкции выше $+500^{\circ}\text{C}$ чаще всего происходит потеря несущей способности конструкций, следствием чего является разрушение. Известно, что при температурах $550\text{--}600^{\circ}\text{C}$ прочность конструкционной стали снижается примерно на 50 % относительно прочности при температуре окружающей среды [7].

Тепловые расширения и большие прогибы стальных элементов вызывают потенциально опасные воздействия на нагретые конструкции. В частности, термически индуцированные силы и смещения во время пожара могут стать критическими с точки зрения управления характеристиками конструкции и вызвать деформации и термические напряжения, которые приведут к структурной нестабильности и / или прогрессирующему разрушению [7, 11, 12].

Согласно авторам публикации [14], современная защита металлоконструкций от огня делится на три способа: нанесение вспучивающихся покрытий, конструктивная защита из классических штукатурных составов или применение конструктивной огнезащиты в виде огнезащитных материалов (рисунок 1.1).

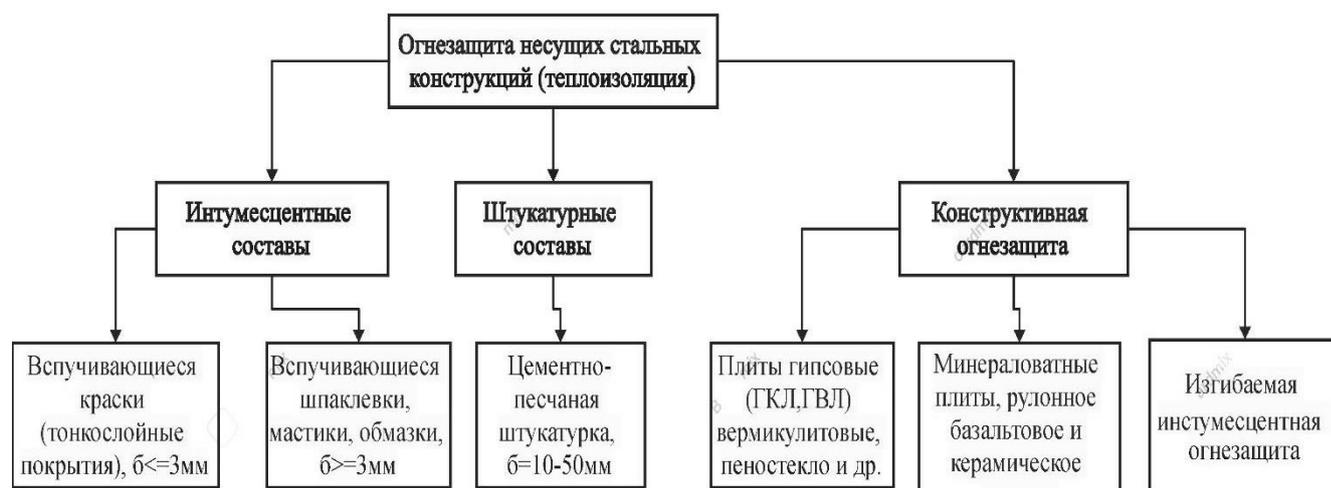


Рисунок 1.1 – Средства и методы огнезащиты металлоконструкций [14]

Пенококс (ПК), образующийся в начале огневого воздействия из слоя тонкослойного ОЗП, представляет собой теплоизолирующий слой, эффективно замедляющий нагревание строительной конструкции до критической температуры в рамках необходимого временного отрезка. Особенности защиты конструкций ПК по сравнению с «готовыми» огнезащитными материалами приведены в таблице 1.1 [18].

Таблица 1.1 – Особенности защиты конструкций ПК в сравнении с «готовыми» огнезащитными материалами

Характеристика	Готовый материал для конструктивной огнезащиты (листы, рулоны, обмазки)	Огнезащитная краска интумесцентного типа
Способ крепления	Присутствуют элементы механического крепления (сетка, направляющие), что увеличивает трудоемкость	Нанесение компрессором – низкая трудоёмкость (до возникновения пожара существует в виде лакокрасочного покрытия)
Подготовка поверхности	Требуется дополнительная АКЗ (СП 28.13330)	Стандартная АКЗ
Декоративное покрытие	Требуется в большинстве случаев	Не требуется
Создание	В заводских условиях	ПК образуется во время пожара
Контроль качества материала	В заводских условиях – целостность, толщина. На конструкции – качество крепления	ПК – контроль и оценка в лабораторных условиях
Корректировка потребительских свойств	Только на производстве	Возможно. Незначительно, при производстве работ
Поставка материала	Листы, рулоны, смеси, крепёжные элементы	Готова к употреблению в таре

При нагревании интумесцентные покрытия (ИП) вспучиваются с образованием вспененного угля (ПК) – материала с низкой плотностью и низкой теплопроводностью (рисунок 1.2), который в пределах определенного времени предотвращает повышение температуры несущей конструкции и способствует сохранению ее структурной целостности и стабильности [18–22].



Рисунок 1.2 – Участок стального профиля, защищенный тонким вспучивающимся покрытием, до (слева) и после (справа) огневых испытаний [16]

Очевидно, что тонкослойные вспучивающиеся покрытия имеют неоспоримые технологические и рыночные преимущества перед конструктивной огнезащитой: методы транспортировки, нанесения, эксплуатации в сочетании с эстетичным внешним видом и наличием потребительских свойств, позволяющих эксплуатацию таких покрытий без применения декоративных или защитных материалов [16], что обеспечило значительный спрос на интумесцентные краски.

В свою очередь, применение интумесцентных огнезащитных покрытий (ОЗП) связано с недостатками, обусловленными ограниченностью огнезащитной эффективности во времени, сложностью оценки качества самого покрытия, кратности ПК (в рамках действующих нормативных документов), а также ряда нерегламентированных в настоящий момент свойств, которые возможно выявить только после огневого воздействия на отверждённое ОЗП.

1.2 Интумесцентная огнезащита

Технология и рецептура изготовления тонкослойных ОЗП регулярно корректируется и совершенствуется в связи с применением более современных

химических компонентов и изменением методик изготовления составов. Регулярный контроль качества компонентов и технологии изготовления в условиях завода-изготовителя является одним из важнейших этапов жизненного цикла интумесцентной краски [24–28], обеспечивающих требуемый итоговый результат в случае пожара.

Общая характеристика. Огнезащитные покрытия вспучивающегося типа являются терморезистивными составами, содержащими тщательно подобранный набор органических и неорганических компонентов, соединение которых в единое целое обеспечивается полимерным связующим [29–31].

Составы вспучивающихся покрытий обычно состоят из источника кислоты («катализатор»), углеродосодержащего соединения («источник углерода»), вспенивающего агента («пенообразователь»), связующих компонентов и различных добавок. Функции всех компонентов широко описаны в литературе [29, 30, 32–35].

Компонентная база, используемая при разработке тонкослойного вспучивающегося покрытия, чаще всего содержит следующие группы веществ [35]:

- а) многоатомные спирты, содержащие в своей молекуле более одной гидроксильной группы;
- б) химические соединения, при нагревании которых до 100–250 °С высвобождаются кислоты или просто неорганические кислоты;
- в) органические амины – соединения, состоящие из одной или нескольких алкильных групп, или амиды – соединения, имеющие карбонильную группу;
- г) галогеносодержащие соединения, являющиеся производными углеводородов, в молекулах которых один или более атомов водорода замещаются атомами галогенов F, Cl, I.

Наиболее широко применяемыми полиолами являются крахмал, полифункциональные спирты, в том числе моно-, ди- или трипентаэритрит. В практике также не исключается возможность применения фенолоформальдегидов, сорбита, резорцина.

К кислотосодержащим компонентам, применяемым при производстве тонкослойных ОЗП вспучивающегося типа, получившим широкое распространение, относится фосфорная кислота, включая меламинафосфат и полифосфат аммония, также входящие в этот перечень.

В качестве компонентов, обеспечивающих процесс вспучивания, чаще всего используют мочевины, меламина, гуанидин и схожие по свойствам химические компоненты и соединения.

В течение последних десятилетий составы были оптимизированы с целью формирования эффективного защитного ПК. В индустрии ИП постоянно предлагаются инновационные усовершенствования: использование гибридных связующих для возможности производства работ при повышенной влажности; применение нановолокон с целью обеспечить повышенную прочность покрытия и уменьшения стекаемости неотверждённого покрытия [36]; добавление нанодисперсии диоксида кремния для формирования более компактного слоя ПК [37]; введение в состав новых наполнителей, наночастиц, силиконов, смол и антипиренов [23, 30, 39] с целью улучшения потребительских и огнезащитных свойств ИП, получаемого на основе интумесцентной краски.

Основой составов тонких ИП, как правило, являются органические растворители или вода. Эти составы обычно применяются в зданиях и сооружениях для огнезащиты в условиях целлюлозного пожара и наносятся с толщиной сухой пленки (0,5–1,5 мм). С другой стороны, толстые ИП (толщиной в несколько сантиметров) нередко имеют эпоксидную основу (двухкомпонентные системы). Толстые вспучивающиеся покрытия применяются в основном в промышленности для защиты в условиях углеводородного пожара [23, 40, 41], а толщина слоя регулируется технической документацией на состав.

Интумесцентные покрытия обычно наносятся в виде трех различных компонентов: грунтовка, базовое покрытие и финишное покрытие. Применение грунта обеспечивает требуемые параметры адгезии ОЗП к поверхности металлической конструкции и повышает параметры коррозионной стойкости. Финишное покрытие может потребоваться в декоративных целях или по

соображениям сохранности покрытия при воздействии погодных условий и агрессивной среды [23]. Одним из важных аспектов является подготовка поверхности перед нанесением, регламентируемая не только технической документацией на материал, но и национальными стандартами. Подготовка основания должна полностью соответствовать требованиям, чтобы создать шероховатую поверхность, облегчить нанесение и улучшить адгезию покрытия [42]. В настоящее время стальные элементы обычно покрывают безвоздушным распылением, быстрым методом, применяемым также на изделиях неправильной формы. Покрытия также можно наносить обычными способами, например, с помощью кисти и валика. Нанесение покрытия точной толщины всегда является сложной процедурой из-за зависимости процесса от нескольких параметров (например, температуры и влажности). При этом всегда необходимо проверять качество конечного покрытия и выполнять инструментальный контроль для обеспечения минимально необходимой толщины [16].

Процесс формирования пенококса. При возникновении пожара и повышении температуры вокруг конструкций с ОЗП запускается процесс вспучивания, который характеризуется изменением внешнего вида ИП и описывается различными стадиями [31, 39, 43–47, 48].

Выделяют следующие стадии вспучивания ИП (рисунок 1.3):

- 1) Разложение под действием температуры (зона плавления) – под действием прямого огня или при повышенной вследствие пожара температуры покрытие достигает критической температуры, содержащийся в интумесцентной краске источник неорганической кислоты подвергается термическому разложению, вследствие чего наблюдается расплавление поверхности огнезащитного материала и его превращение в вязкую жидкость.

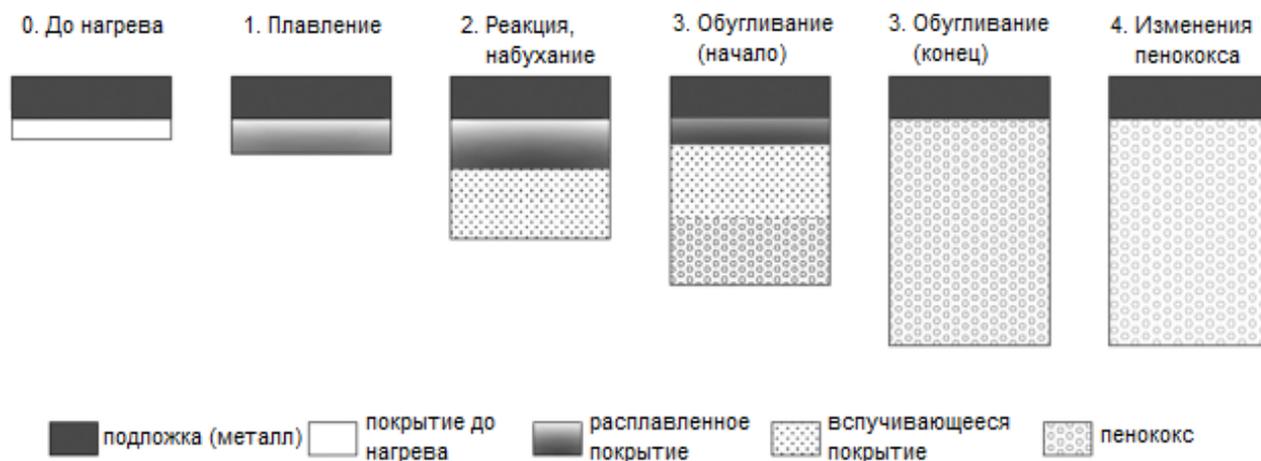


Рисунок 1.3 – Схема различных стадий процесса вспучивания [16]

2) Вспучивание (набухание в зоне реакции) – пенообразователь в процессе нагрева активируется, вызывая эндотермическую реакцию, которая поглощает тепло защищаемой металлической конструкции и разлагается, выделяя газообразные продукты. Пузырьки газа задерживаются в ОЗП, вызывая многократное увеличение толщины огнезащитного слоя, формируя пористое покрытие с низкой плотностью, которое и обеспечивает замедление нагрева защищаемой конструкции до критической температуры [16]. Вспучивание, как правило, начинается при температуре выше 300 °С и продолжается до момента окончания запаса пенообразователя, заложенного в рецептуре интумесцентной краски или момента набора углеродной матрицей достаточной вязкости для продолжения удержания пузырьков газа.

3) Обугливание (зона обугливания) – при повышении температуры пористая среда затвердевает, остаточные летучие вещества высвобождаются с образованием высокоуглеродистой структуры ПК, которая обычно характеризуется черным / серым цветом на открытой поверхности (рисунок 1.4).

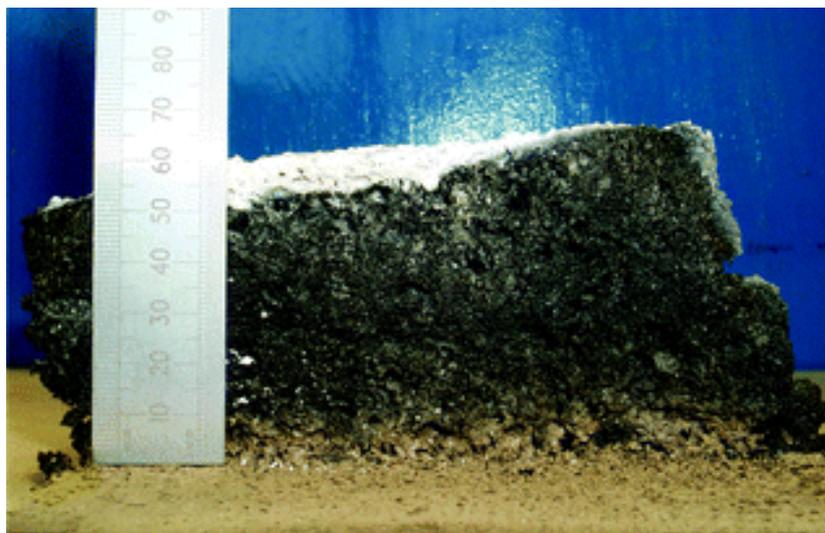


Рисунок 1.4 – Интумесцентное покрытие [45]

4) Структурные изменения ПК (зона разложения ПК) – ПК окисляется и выделяется CO_2 : черная и компактная структура ПК превращается в нестабильную мелкодисперсную структуру белого цвета. Классификация стадий структурного изменения ПК, зон и соответствующих им пороговых температур происходит в пределах определенного диапазона температур (рисунок 1.5), который напрямую зависит от рецептуры интумесцентной краски и методов испытаний на огнестойкость, которые отличаются у разных исследователей [43–45, 47, 49–57].

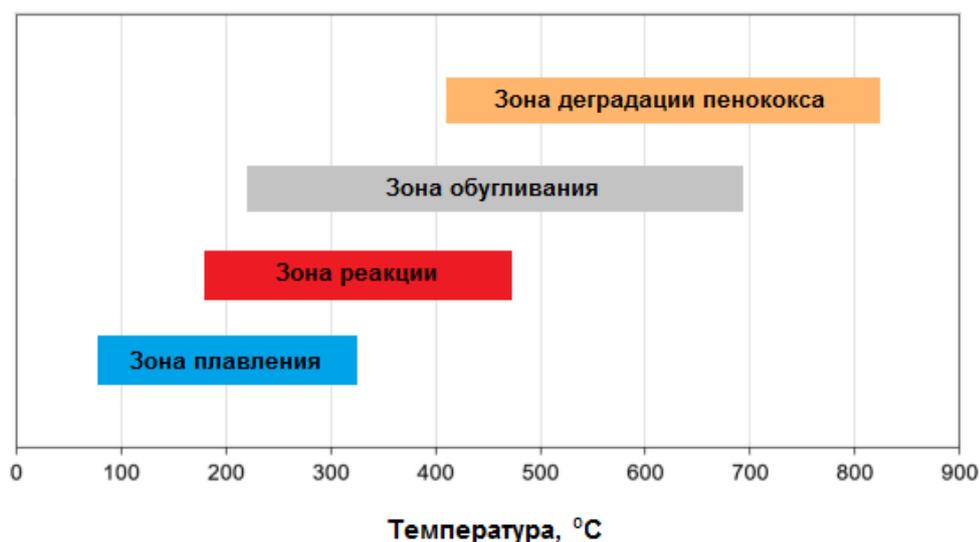


Рисунок 1.5 – Пороговая температура для разных стадий процесса вспучивания [16]

Характер развития четырех стадий формирования ПК сильно зависит от химического состава интумесцентной краски. Однако химические и физические процессы при повышении температуры происходят в описанной последовательности [47]. Стадия вспучивания играет основную роль в процессе формирования ПК. Чаще всего эта стадия определяет переход от зоны затвердевания к зоне реакции [58]. Согласно данным математического моделирования, полученным авторами [59], огнезащитная эффективность ИП в значительной мере зависит от условий формирования ПК, кратности и температуры вспучивания. Соответственно, необходимо увеличивать толщину слоя ИП, обеспечивать его сохранность и уменьшать температуру вспучивания [60].

1.3 Испытания интумесцентных покрытий на огнестойкость

Оборудование, нормы и методы испытаний на этапе разработки. Обширное использование в проектных решениях тонкослойных ОЗП для обеспечения требуемого уровня огнестойкости конструкций из стали и железобетона значительно стимулировало исследования в сфере оценки их параметров сопротивления огневому воздействию [16, 29, 30, 61, 62].

Многие авторы подчеркивают недостатки стандартных испытаний на огнестойкость, критикуют существующие методики за излишнее упрощение, ограничения и неопределенность результатов. Чтобы решить указанные проблемы, предлагается использование комплексных подходов и методов анализа эффективности вспучивающихся защитных покрытий при воздействии разных температурных режимов и открытого пламени.

Интумесцентные покрытия являются коммерческими продуктами и должны соответствовать определенным национальным и / или международным стандартам. Использование промышленных норм в научных исследованиях осложняется недостаточной доступностью крупного специализированного оборудования, а также большими затратами времени и ресурсов, необходимыми для проведения

экспериментов. Тем не менее, отдельные ученые применяют элементы промышленных стандартов, такие как стандартные зависимости изменения температуры от времени [63].

Стандарты для целлюлозных пожаров применимы, если основной источник горения состоит из целлюлозных материалов, таких как бумага или дерево. Традиционно это были жилые дома, офисы или склады. Однако за десятилетия, прошедшие с момента введения стандартов, источники горения в таких зданиях изменились. Пожарная нагрузка и скорость тепловыделения синтетических материалов могут сильно отличаться от целлюлозы. Таким образом, реальный сценарий развития пожара в современном здании может значительно отличаться от принятых в нормативной документации номинальных температурно-временных кривых [64]. Однако эти нормативные документы остаются основными при моделировании пожара и оценке воздействия пожара. Наиболее распространённым в мире стандартом для испытаний на огнестойкость является ISO 834 (ГОСТ 30247.0-94) [65], регламентирующий в том числе условия для испытаний и оценки огнестойкости элементов строительных конструкций.

В процессе испытания и калибровки в печах, работающих на жидком или газообразном топливе, согласно требованиям национального стандарта должен обеспечиваться температурный режим, характеризуемый следующей зависимостью:

$$T = 345 \cdot \lg(8t + 1) + T_0, \quad (1.1)$$

где T – температура в печи по прошествии времени t , °C;

T_0 – исходная температура в печи (температура окружающей среды), °C;

t – время, прошедшее с момента начала испытания, мин.

Большинство исследований ИП по-прежнему основывается на номинальных кривых зависимости температуры от времени. Однако не существует двух одинаковых возгораний и не существует «идеальной» кривой зависимости температуры от времени, охватывающей все возможные сценарии возгорания [63]. Альтернативой номинальным кривым являются параметрические кривые горения, которые позволяют изменять пожарную нагрузку и условия вентиляции. Еврокод 1

(EN 1991-1-2) определяет параметрическую кривую зависимости температуры от времени, которая учитывает тип и размер здания, а также размер и расположение окон и пожарной нагрузки [63]. Примером эмпирической кривой пожара, основанной на реальных испытаниях на огнестойкость, является кривая, разработанная Барнеттом [66, 67].

На этапе исследований и создания новых видов ОЗП вспучивающегося типа применяются различные инструменты и оборудование, что позволяет в наиболее сжатые сроки проверять параметры создаваемых составов [58–70], проводить испытания в стандартных условиях пожара [71, 72] и получать данные о еще нестандартизированных параметрах [73, 74], которые способствуют более глубокому пониманию и изучению свойств тонкослойных ОЗП.

Однако это затрудняет сравнение различных составов покрытий в разных исследовательских группах и опубликованной литературе. Точно так же не все испытательное оборудование одинаково хорошо подходит для всех целей.

Источники нагрева, представленные в научной литературе, различаются по таким параметрам, как основной механизм теплопередачи (конвективный или радиационный), достижимые скорости нагрева, соответствие номинальным или параметрическим температурно-временным кривым и другое. Наиболее часто для нагрева применяются печи, радиационные нагреватели, пламя горелки. Ряд исследований посвящен теплопередаче во вспучивающихся покрытиях [75–77].

Чистый тепловой поток к образцу Q представляет собой баланс между радиационным ($q_{\text{рад}}$), конвективным ($q_{\text{конв}}$) и кондуктивным ($q_{\text{конд}}$) тепловым потоками. Вклад различных типов теплового потока, а также их влияние зависит от типа источника тепла и геометрического расположения. Причем тепловой поток, падающий на поверхность образца, – это не то же самое, что общий чистый тепловой поток к образцу [63].

Пламя горелки является одним из наиболее распространенных источников тепла для проверки характеристик вспучивающихся покрытий [63, 78]. Капитальные и эксплуатационные затраты на горелку Бунзена значительно ниже, чем на конусный калориметр или печь. Передача тепла от падающего пламени к

подложке в значительной степени определяется конвекцией [79]. В этом случае речь идет о принудительной, вызванной потоком газа, конвекции, с которой связано увеличение коэффициента конвективной теплоотдачи (α). Величину α трудно предсказать, поскольку на нее влияет ряд параметров: уровень турбулентности, геометрия сопла горелки, расстояние между соплом горелки и подложкой и фактическая температура пламени [79]. Фактическая температура пламени зависит от используемого топлива, отношения объемов топлива и воздуха (или кислорода), уноса окружающих газов, а также турбулентности и сопутствующего смешивания топлива с кислородом [63]. Кроме того, измерение температуры пламени – нетривиальная задача и обычно требует корректировки зарегистрированной температуры за счет радиационных и кондуктивных потерь тепла от спая термопары [80]. Кроме того, α также изменяется в радиальном направлении, что еще больше усложняет оценку условий нагрева, которым подвергается подложка. По мере расширения вспучивающегося покрытия расстояние до сопла горелки не только уменьшается, но и субстрат может искривляться, что также влияет на α [79]. Учитывая вышеизложенное, ясно, что определение тепловых пограничных условий для падающего пламени является очень сложной задачей, если не указаны все ключевые экспериментальные параметры.

Специально для оценки вспучивающихся покрытий в экстремальных условиях разработана высокопроизводительная горелка [81], которая заправляется кислородно-пропановой смесью, что позволяет проводить эксперименты при температуре до 1800 °С. Такие экстремальные температурные условия могут возникать при возгорании металлических предметов или при входе космических кораблей в атмосферу Земли.

Авторами [82] выявлены значительные расхождения результатов испытаний ИП в стандартных условиях в печи при реализации одномерного теплопереноса (в лабораторных условиях) и крупномасштабных испытаний на объекте защиты. Следует учитывать, что воздействие высокотемпературного газового потока приводит к интенсивному разрушению ОЗП. На стойкость ОЗП влияют

аэродинамика газопламенного потока, условия тепло- и массоотвода [83, 84]. Достоверные результаты огневого испытания ОЗП можно получить только в условиях, максимально приближённых к условиям реального пожара, при испытании полностью готовых ИП на объекте [18, 84].

Важной проблемой следует считать вопрос контроля состояния ОЗП в контексте старения полимера как на протяжении эксплуатации покрытия, так и после окончания гарантированного срока эксплуатации. Эффективность вспучивающихся ОЗП со временем снижается примерно на 25 % за 25 лет, что связано в основном со снижением кратности вспучивания [85].

Авторы публикаций [85, 86] рассматривают проблему установления и обеспечения гарантийных сроков эксплуатации ИП и обосновывают важность применения теплотехнических расчетов температурных полей в конструкциях с ИП и проведение комплексных исследований с целью прогнозирования влияния теплового воздействия на параметры вспучивания и сохранность вспученного слоя. При этом эффективным инструментом для обеспечения оптимальной огнезащиты и требуемой огнестойкости является математическое моделирование в сочетании с надёжными огневыми экспериментами [86]. Моделирование процессов теплопереноса в пористых системах при высоких температурах важно для оценки эффективности теплозащиты вспучивающихся материалов. Необходимо создание моделей, которые позволят исследовать факторы, влияющие на огнезащитную эффективность, и с достаточной степенью достоверности предсказывать поведение ОЗП в условиях пожара [87].

Выбор параметров оценки качества интумесцентной огнезащиты

Проблема выбора критериев для контроля качества ПК актуальна [18]. При анализе научных источников выявлено, что в основном исследователи акцентируют внимание на свойствах краски (прочность и адгезия), на параметре кратности ПК, а механические свойства и однородность ПК остаются без внимания [88]. При этом упоминания о прочности ПК не выходят за рамки лабораторных тестов на стационарном оборудовании [89–91].

Авторы [92] обращают внимание на зависимость огнезащитных свойств ПК от устойчивости к выгоранию, механическому разрушению и адгезии. Механическую прочность ПК предлагают оценивать методом пенетрации. Например, при коэффициенте вспучивания в пределах 18–27 предел прочности при пенетрации составляет 45–110 гс/см², но при коэффициенте вспучивания 33 и выше предел прочности снижается в 1,5–2 раза, что сопровождается заметным снижением огнезащитной эффективности [92]. Согласно публикации [93] при коэффициенте вспучивания ПК выше 30 в течение небольшого промежутка времени ПК начинает растрескиваться и терять огнезащитную эффективность.

Отмечается, что тепловое воздействие на образцы в муфельной печи или нагревателях других типов не обеспечивает необходимого теплового потока на поверхность образца [94]. Механическое сопротивление ПК было изучено с использованием горелки Бунзена и нескольких новых методик измерения прочности на сжатие [95, 96]. Подход к испытаниям, основанный на применении модифицированной муфельной печи и её комбинаций с дополнительным оборудованием, в том числе высокотемпературным эндоскопом, предложен авторами [73, 97].

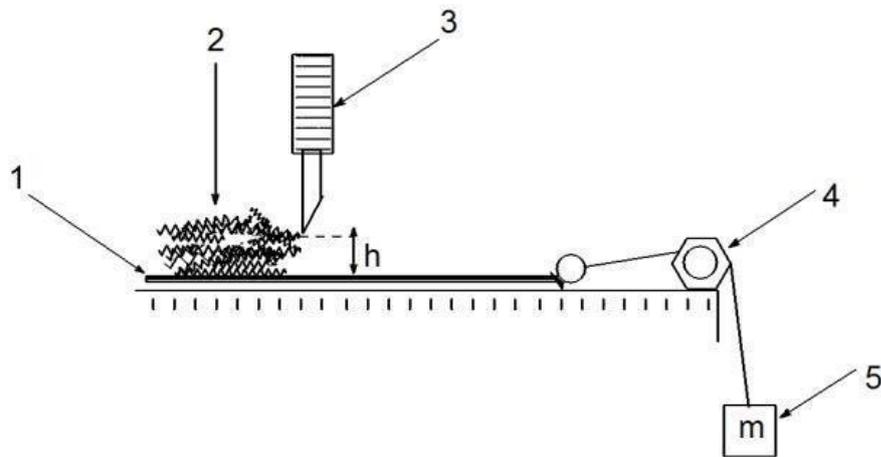
Разработан метод визуального контроля состояния среза ПК [98], для которого нужна программа расшифровки изображения и вычислительное устройство, а также библиотека стандартизированных изображений срезов качественного и некачественного ПК с численной привязкой к механическим свойствам последнего. Для реализации метода на объекте требуется миниатюрная телекамера с качественным разрешением для микрообъектов, а также принятая методика подготовки срезов ПК. Следует добавить, что для такого анализа нужно получить и сам ПК на данном участке покрытия.

Авторы [99] отмечают, что увеличение кратности ПК выше значений, характерных для конкретных составов красок, ведёт к усилению радиационного переноса тепла в пористой среде и к возможному нарушению целостности структуры ПК из-за снижения его прочности. Для повышения огнезащитной эффективности логично предположить необходимость в повышении прочности сформировавшегося

ПК при воздействии высоких температур. Таким образом, оцениваться должны не только параметры вспучивания, но и прочностные характеристики.

Так как немаловажным параметром, обеспечивающим огнезащитную эффективность, является сохранность полученного ПК на поверхности металлических конструкций, необходимо обеспечить контроль адгезионно-прочностных характеристик ПК [100, 101]. Предложены методы оценки: стойкость ПК при усилии сдвига; сопротивление продавливанию образовавшегося огнезащитного слоя и ряд ударных методов [102–104].

Усилие сдвига вспученного слоя в лабораторных условиях определяют согласно схеме на рисунке 1.6. Для сдвига массива ПК применяют специальный закрепленный на определенной высоте (h) нож [102].



1 – металлическая пластина, 2 – ПК, 3 – нож, 4 – блок, 5 – груз

Рисунок 1.6 – Схема прибора, для определения адгезионно-когезионных параметров ПК [102]

Для измерения параметров усилия сопротивления продавливанию (рисунок 1.7) следует использовать два метода: продавливание вспученного слоя с помощью груза известной массы или продавливание ПК на заданную глубину посредством груза. Способ продавливания на известную глубину более информативен.

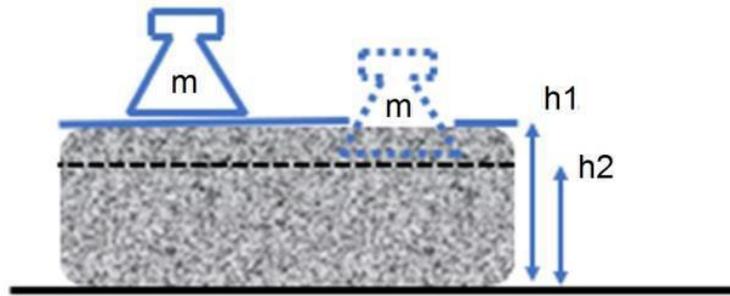


Рисунок 1.7 – Определение параметров прочности слоя ПК методом продавливания [102]

Таким образом, разные авторы в своих исследованиях отмечают физико-механические свойства ПК как весьма важные для объективной оценки поведения огнезащитного ИП во время пожара.

Оценка качества огнезащиты вне лаборатории

В качестве параметра для оценки качества огнезащиты в условиях реального объекта в научных публикациях чаще всего предлагают температуру субстрата. При этом отмечают проблему: данный параметр не позволяет легко сравнивать результаты различных исследований, так как температура субстрата зависит от тепловых условий, в которых находится образец (с учетом также изоляции тыльной стороны подложки), и толщины первичного покрытия. Следовательно, более полезным параметром для оценки эффективности огнезащиты вне лаборатории является эффективная теплопроводность ПК [71, 76, 105–109].

Другими параметрами, которые можно измерять непосредственно на объекте, являются коэффициент расширения ПК, внутренняя температура и температура поверхности ПК, устойчивость к механическому воздействию, кинетика термического разложения, реологические свойства. Наиболее перспективны и требуют дальнейшего изучения механические испытания и измерение внутренней и поверхностной температуры ПК [63].

В качестве источников тепла для исследования огнезащиты в условиях объекта защиты, по мнению большинства авторов, перспективны пламя горелки и радиационные нагреватели. Однако в отдельных публикациях сообщается о применении модифицированных печей. Примером являются высокотемпературные эндоскопы для наблюдения за расширением ПК и

изменением его цвета [69, 73, 97]. Другой пример – метод, основанный на непрерывном контроле физической целостности, механической стабильности и теплоизоляционной эффективности полностью сформированного ПК под потоком воздуха (воздушной струей) до того, как стальной лист достигнет критической температуры. Для этого разработана настольная печь для воспроизведения сценария углеводородного пожара (рисунок 1.8) [110].

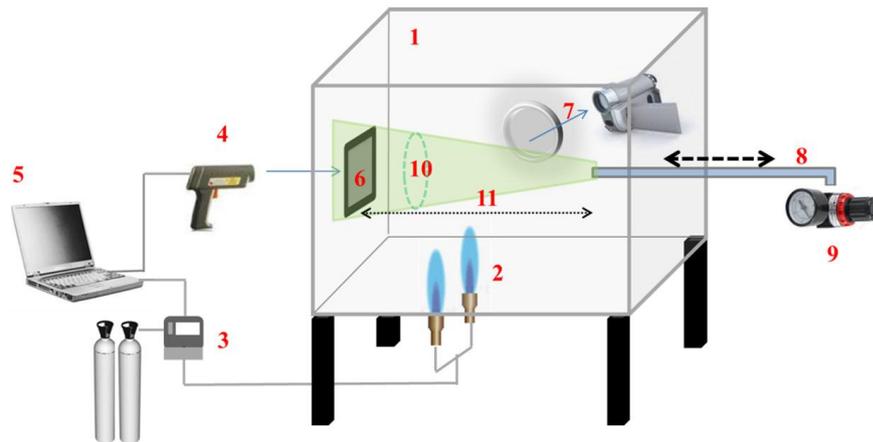


Рисунок 1.8 – Схематическое изображение стендовой экспериментальной установки для огневых и авиационных испытаний [110]

1.4 Нормативные документы, регламентирующие приемочный контроль качества огнезащитной обработки

Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» регламентирует требования к пределам огнестойкости строительных конструкций [1]. Нормативные требования к параметрам тонкослойных ОЗП регламентируются в том числе в ГОСТ Р 53295-2009 [111] и СП 433.1325800.2019 [4].

Актуальные в Российской Федерации методы оценки интумесцентной огнезащиты изложены в следующих документах: Методика ВНИИПО [111], методика, описанная в ГОСТ Р 53295-2009 [111], и методики, описанные в СП

433.1325800.2019 [4]. Стандартные методы предусматривают проверку огнезащитной эффективности в лабораторных условиях.

Методика Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны ВНИИПО МЧС России «Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу»

Методика, разработанная ВНИИПО [111], применяется в отрасли более двадцати лет и не требует сложного и дорогого оборудования. Для выполнения работ необходимо отдельное помещение с вытяжной пожаробезопасной вентиляцией.

Суть методики состоит в измерении времени с момента начала нагрева до достижения необогреваемой стороной образца критической температуры (для стали – 500 °С). Определение теплоизолирующих свойств ИП по металлу проводят на специальной установке (п. 3 [111]). Температурный режим испытаний соответствует представленному в таблице 1.2 [111].

Таблица 1.2 – Температурный режим испытаний ИП

Время t , мин	Температура T , °С	Время t , мин	Температура T , °С
5	550–590	30	810–840
10	650–690	35	840–870
15	710–750	40	860–890
20	755–795	45	870–900
25	790–820		

Примечание: t – время от начала испытания; T – температура в печи, соответствующая времени t , °С

Для проведения испытаний согласно п. 5 [111] из стали марки Ст3 (ГОСТ 380-94) нужно изготовить три пластины с размерами 140 (±1)×80 (±1) мм при толщине 0,8–0,9 мм. Перед нанесением огнезащитного состава (ОЗС) необходимо выполнить предварительную подготовку поверхности. Затем согласно инструкции завода-изготовителя наносят состав. Сушка испытуемых образцов происходит при нормальных температурно-влажностных условиях в срок не менее 14 суток (п. 4

[111]). Время, прошедшее от начала испытаний до достижения критической температуры образца на его необогреваемой стороне, определяет теплоизолирующие свойства ИП. По факту достижения температуры +500 °С испытание завершают. При соблюдении требований всех этапов подготовки и испытаний, а также при соблюдении технологии производства ОЗП допускается различие в результатах испытаний трех образцов не более чем на 15 % от вычисленного среднеарифметического значения. В противном случае выполняют дополнительные испытания.

Метод определения огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53295-2009

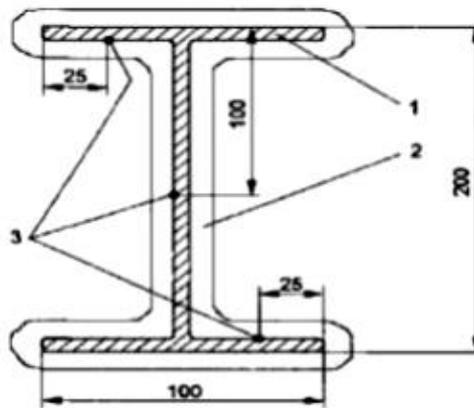
Суть и очередность действий при испытании по ГОСТ Р 53295-2009 [112] содержится в п. 5 и заключается в определении периода времени от начала теплового воздействия на опытный образец до наступления предельного состояния этого образца.

Испытательное оборудование состоит из: установки для огневых испытаний малогабаритных образцов стержневых конструкций; устройства для установки образца; комплекта приборов для измерения и регистрации параметров, включая оборудование для проведения кино-, фото- или видеосъемок. Система подачи и сжигания топлива, измерения и регистрации параметров, температурный режим в установке регламентируются ГОСТ 30247.0-94 [65].

Для испытаний необходимо изготовить два идентичных образца – стальные колонны двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239-89 или профиля № 20Б1 по ГОСТ 26020-83. Высота образца (1700±10) мм. Огнезащитный состав наносится (монтируется) на образцы в соответствии с технической документацией (подготовка поверхности образцов, тип грунтовки, количество и толщина наносимого слоя и т.д.) в присутствии специалистов-испытателей.

Необходимо обеспечить условия проведения испытаний в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 [65]. В процессе подготовки к испытаниям необходимо выполнить расстановку термоэлектрических преобразователей (ТЭП) в печи и на образце, проверку и отладку систем подачи и сжигания топлива, приборов, установку опытного образца в печи.

До начала испытаний следует выполнить серию контрольных измерений фактической толщины отверждённого покрытия, нанесённого на образец конструкции. Серия измерений толщины ОЗП проводится не менее чем в десяти точках по периметру обогреваемой поверхности конструкции, с шагом не превышающим 500 мм по высоте образца. За результат принимается среднее арифметическое значение результатов всех измерений. Допускается, что среднее квадратическое отклонение может быть не более 20 % от результата измерений. Температура металла опытного образца измеряется с помощью ТЭП, изготовленных из провода диаметром не более 0,75 мм. Термопары на испытываемом образце следует установить методом зачеканивания в количестве трех штук: в среднем сечении образца на стенку двутавра и на внутренние поверхности полок двутавра. Схема расстановки термопар представлена на рисунке 1.9.



1 – двутавр № 20; 2 – ОЗП; 3 – ТЭП

Рисунок 1.9 – Точки крепления ТЭП к испытательному образцу [112]

Температура испытываемого металлического образца определяется как среднее арифметическое значение показаний расположенных в регламентированных местах термопар. В ходе испытаний регистрируют следующие показатели:

- время наступления предельного состояния образца;
- изменение температуры в печи согласно ГОСТ 30247.0-94 [65];

- поведение средства огнезащиты (вспучивание, обугливание, отслоение, появление трещин, выделение дыма, продуктов горения и т.д.);
- изменение температуры металла опытного образца.

При испытаниях отсутствует статическая нагрузка при четырехстороннем тепловом воздействии до наступления предельного состояния опытного образца. За предельное состояние принимается достижение металлом опытного образца критической температуры, равной 500 °С (среднее значение по показаниям трех термопар).

Огнезащита стальных конструкций в соответствии с требованиями СП 433.1325800.2019

Свод правил 433.1325800.2019 [4] «Огнезащита стальных конструкций. Правила производства работ» регламентирует требования по устройству ОЗП. В п. 6.2 [4] изложены методы контроля покрытий.

Проверка качества ОЗП выполняется по следующим направлениям [4, п. 6.2.1]:

- визуальный контроль;
- документальный контроль;
- инструментальный контроль посредством контрольно-измерительных приборов (КИП).

Визуальным контролем определяется соответствие состояния поверхности покрытия требованиям нормативно-технической документации на применение ОЗС, в т.ч. наличие неокрашенных мест, трещин, отслоений покрытия от основы, вздутий, осыпаний; посторонних пятен, инородных включений и других повреждений [4, п. 6.2.2].

Контроль посредством КИП [4, п. 6.2.4] используется для определения толщины покрытия, величины адгезии, оценки условий проведения огнезащитных работ и отслеживания параметров огнезащитной эффективности при эксплуатации ИП. Толщину ОЗП [4, п. 6.2.4.1] определяют по ГОСТ 31993-2013 [113]. Измерения проводят в точках, расположенных на расстоянии не менее 20 мм от края ОЗП и около 50 мм друг от друга.

Проверка состояния и приёмка в эксплуатацию тонкослойных ОЗП по показателям качества проводится до подписания акта выполненных работ методом документального, визуального и инструментального контроля [4, п. 6.3].

При приемке конструкций с нанесённым тонкослойным ОЗП проверяют:

- соответствие результатов выполненных работ проектной, нормативной и технической документации;
- внешний вид покрытия на предмет соответствия требованиям технической документации;
- толщину покрытия на предмет соответствия данным проекта огнезащиты;
- адгезию ОЗП к металлоконструкции.

Кроме этого, в лабораторных условиях определяют коэффициент вспучивания покрытий.

В случае несоответствия ОЗП хотя бы по одному параметру покрытие не допускается к эксплуатации в качестве огнезащитного.

П. 6.5 [4] содержит рекомендации по проверке и контролю сохранности эффективности ОЗП на стадии эксплуатации объекта.

Регулярный контроль состояния ОЗП осуществляется в соответствии с требованиями Постановления Правительства РФ № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации» и включает необходимость проверки на предмет выявления каких-либо дефектов покрытия.

В испытаниях участвуют не более пяти образцов ОЗП конструкций площадью более 2 см², отобранные с каждой 1000 м² поверхности ОЗП. Места отбора образцов фиксируются в акте и должны быть восстановлены до проектной толщины по методике восстановления, описанной в технической документации на применяемый материал. Образцы-идентификаторы огнезащитного материала, используемого для обеспечения огнестойкости нормируемого предела конструкций на объекте, отбираются на заводе-изготовителе этого ОЗС с составлением акта отбора образцов и должны соответствовать требованиям сертификатов соответствия и иной технической документации завода-изготовителя [4, пп. 6.5.2.1, 6.5.2.2].

Методы испытания образцов [4, п. 6.5.3].

Определение коэффициента вспучивания образцов:

Испытание проводится в муфельной печи согласно [4, пп. 6.5.3.1, 6.5.3.2].

Подробное описание метода приведено в разделе 3.2 настоящего диссертационного исследования.

Термический анализ [4, п. 6.5.3.3]:

Термический анализ выполняется в соответствии с ГОСТ Р 53293-2009 [115].

Данные испытаний исследуемых образцов сравнивают с данными испытаний образцов-идентификаторов. Сравниваются значимые параметры термического анализа [115], полученные на приборах одного класса и при идентичных условиях испытания:

- масса и геометрические размеры образцов;
- форма, материал и геометрические параметры тигля;
- вид газа динамической атмосферы и расход газа;
- темп нагревания.

Анализ и оценку полученных результатов проводят согласно разделу 7 [115].

Испытание контрольных пластин [4, пп. 6.5.3.4–6.5.3.7]:

Осуществляются методом термогравиметрии [115]. Сравнению подлежат итоговые показатели ТА (термоаналитические параметры и графические зависимости) для эталонного образца (образца-идентификатора) и исследуемого образца. При анализе проверяют такие параметры, как [4, п. 6.5.3.5]:

- схожесть сравниваемых ТА-кривых во всем сравниваемом диапазоне температур;
- наличие или отсутствие совпадения числа значимых максимумов дифференциальной термогравиметрии в диапазоне 120–550 °С;
- данные отклонений сравниваемых идентификационных параметров образцов исследуемого материала и исходного образца при использовании экспериментально полученных среднеарифметических значений.

Метод термогравиметрии может применяться как один из способов идентификации ОЗП и подтверждения сохранения огнезащитной эффективности

ИП [4, п. 6.5.3.6]. На всех этапах жизненного цикла ОЗП в рамках объекта защиты, от входного контроля при приёмке материала на объекте до инструментального контроля результатов работ персональная ответственность возлагается на исполнителей [4, п. 6.5.3.7].

Авторы публикации [116] обращают внимание на следующие недостатки методики СП 433.1325800:

- при поставке ОЗС на объект защиты эталонные пластины в качестве обязательной опции не доставляются и не всегда имеются у производителей работ;
- толщина сухого слоя ИП напрямую влияет на коэффициент вспучивания, в соответствии с проектом огнезащиты, но толщина покрытий в рамках одного объекта и разных пределов огнестойкости различна;
- оборудование для применения метода термического анализа является дорогостоящим, его применение не всегда возможно.

1.5 Выводы по главе 1

В течение последних десятилетий исследования интумесцентной огнезащиты несущих конструкций в основном развивались по двум направлениям:

- исследования состава и свойств ИП;
- исследования методов оценки огнезащитной эффективности ИП как теплового барьера для структурных элементов конструкций.

С одной стороны, исследователи постоянно предлагают новые составы вспучивающихся материалов для создания более эффективной и надежной огнезащиты. С другой стороны, пожаробезопасность элементов конструкций, защищенных интумесцентными красками, по-прежнему основана на соблюдении стандартных испытаний на огнестойкость в печах. Обычно используются упрощенные инженерные методы, основанные на едином сценарии пожара, представленном стандартной температурно-временной кривой пожара.

Авторы многих публикаций обращают внимание на зависимость огнезащитной эффективности ИП от условий нагрева и показывают, как

воздействие огня, отличное от стандартного, может привести к неполному (или неэффективному) набуханию, плавлению или расслоению ОЗП. Для преодоления вышеупомянутых проблем проводятся всесторонние исследования по изучению эффективности ИП во время пожара, предлагаются различные методики испытаний с использованием различных экспериментальных установок. Каждый из предлагаемых подходов позволяет устранить определенные пробелы в исследованиях и оптимизировать изучение отдельных аспектов, связанных с интумесцентной огнезащитой.

При изучении стандартных методик оценки качества ОЗП, принятых в РФ, сделаны следующие выводы:

- стандартные способы предполагают испытания только в условиях специально оборудованной лаборатории и их невозможно реализовать непосредственно на объекте защиты;
- для испытаний требуется объёмное, громоздкое и дорогое оборудование;
- испытательное оборудование имеется только в нескольких городах РФ, и в абсолютном большинстве случаев требуется междугородная транспортировка образцов;
- транспортирование образцов ИП до лаборатории не исключает их случайной или преднамеренной подмены;
- на проведение таких испытаний требуется неоправданно больше времени и средств.

В научной литературе отсутствует полная информация о взаимозависимости параметров применяемой интумесцентной краски и формирующегося из нее ПК, об экспресс-методах, позволяющих быстро и незатратно определять теплоизоляционные характеристики ОЗП в лабораторных условиях, что должно предшествовать переходу к дорогостоящим стандартным испытаниям. Информация о разработке специальных приборов и устройств для оценки величины адгезии и механических свойств ПК в условиях объекта защиты в научной литературе почти отсутствует.

Данные об изменении параметров ПК, образующегося из ОЗП после процедур ускоренного старения, имеются в недостаточном объёме, но отсутствует

стандартизированная методика измерения параметров ПК и их допустимых пределов.

Основными проблемными факторами, которые влияют на реакцию формирования ПК во время пожара и, соответственно, на эффективность интумесцентной огнезащиты, по мнению авторов исследований, являются следующие:

- термическое поведение защищаемой конструкции (например, стальной);
- условия нагрева;
- толщина нанесенного покрытия;
- соответствие методик испытаний на огнестойкость.

Среди наиболее актуальных задач повышения огнезащитной эффективности ИП в научных публикациях отмечается необходимость:

- разработки общей методологии испытаний, которая даст возможность в явном виде количественно оценить эффективность ИП, подверженных различным потенциальным условиям пожара;
- создания несложных моделей для количественной оценки зависимости эффективности огнезащиты от тепловых и физических свойств ИП, подверженных различным условиям нагрева, и для получения реалистичных и надежных прогнозов огнестойкости конструкций, защищенных ИП.

Вышесказанное является подтверждением актуальности выбранной темы исследования. Считаем, что требуется разработка методики контроля параметров интумесцентных ОЗП и технических средств для ее реализации непосредственно на объекте защиты, позволяющей определять основные физико-механические свойства вспучивающихся покрытий и верифицировать математические модели процессов вспучивания в реальных условиях эксплуатации.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе представлены материалы и методы, используемые в процессе исследования, в том числе, методы контроля параметров ИП (методы экспресс-анализа), разработанные автором настоящего диссертационного исследования.

2.1 Подготовка материалов для исследования

Интумесцентные краски

При выборе основного огнезащитного материала для выполнения экспериментальной части был проведен анализ ОЗС, идентичных по цене и близких по параметрам (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Характеристики огнезащитных красок

Наименование интумесцентной краски	Разбавитель	Плотность при температуре $(20 \pm 2) ^\circ \text{C}$, г/см ³	Массовая доля нелетучих веществ не менее, %	Кратность кокса, не менее	Температура хранения	Влажность при нанесении, не более, %	Срок полезной эксплуатации, лет	Толщина покрытия для V группы, при ПТМ* = 3,4 мм	Расход покрытия для V группы, при ПТМ* = 3,4 мм, кг
Огнеза-УМ	Р-4, ксилол	1,1–1,4		20	40 < t < 60	80	10	1,8	3,06
01-PROFI	вода	1,45			T < +20	80	20	0,85	1,2
Стабитерм-219	вода	1,2–1,3	65		+5 < t < +40	80	25	0,75	1,16
Термобарьер	ксилол		70			90	30	1,1	1,65
Ecofire	вода	1,1	69		+5 < t < +50	75	20	0,85	1,11
MIK Paint Solvent	растворитель	1,28	71	45	+5 < t < +35	85	30	0,88	0,97
Defender M solvent	толуол ксилол	1,28	65	60	-25 < t < +35	80	30	0,85	1,53
Пламокор-2	ксилол	1,3–1,45	73	20	-40 < t < +40	80	25	0,8	1,2
Декотерм Р	толуол	1,25	70	20	-40 < t < +40	80	25	0,8	1,36
Стабитерм 207	ксилол	1,25–1,4	72		-25 < t < +35	80	25	0,8	1,22

Примечание: *ПТМ – приведенная толщина металла

Данные таблицы 2.1 получены из открытых источников и официальных сайтов заводов-изготовителей ОЗС. В связи с отсутствием ряда параметров в открытых источниках заполнены не все ячейки таблицы 2.1.

Огнезащитная эффективность 45 минут при приведённой толщине металла 3,4 мм у большинства материалов достигается при толщине сухого слоя 0,75–1,1 мм, массовая доля нелетучих веществ 65–72 %.

В качестве материала для экспериментов использовали ОЗС «Defender M Solvent», «Defender M», «Defender ME», производимые ООО «Лаборатория «Евростиль» (г. Москва) на стирол-акриловом и эпоксидном связующих на базе системы «полифосфат-меламин-пентаэритрит». Данная краска широко применяется, отличается простотой подготовки перед применением, удобством нанесения и быстротой сушки. Материал имеет параметры, аналогичные большинству красок, приведённых для сравнения в таблице 2.1. Завод-изготовитель предоставил необходимое количество образцов состава для выполнения экспериментов. Кроме этого, готовили модельные краски аналогичного компонентного состава на стирол-акриловом связующем марок Экоформ 2245 (ООО ПФК «ЭкоКемикал»). Вспучивающая система – «полифосфат аммония – меламин – пентаэритрит», наполнитель и краситель – оксид титана. В качестве растворителей применяли орто-ксилол нефтяной (ООО «Хим-абсолют»), уайт-спирит (нефрас С4 150/200) (АО «Мосхим»).

Подготовка образцов с интумесцентными покрытиями и лабораторный обжиг

Для испытания огнезащитных свойств ИП краску наносили на пластины толщиной 3 мм из стали марки Ст3 (ГОСТ 380-94). Размер пластин – 140×80 мм – аналогичен рекомендуемому в Методике ВНИИПО [111]. Поверхность стальных пластин, очищенную до степени 2 по ГОСТ 9.402, перед нанесением краски обезжиривали ацетоном (ГОСТ 2788-84). После подготовки поверхности наносили ОЗС необходимой толщины. Контрольный замер слоя проводился гребёнкой по сырому покрытию и электромагнитным толщиномером по отверждённому. Толщину сухого покрытия варьировали в пределах 850–900 мкм.

Обжиг испытуемого образца выполняли в муфельной печи в соответствии с методикой [111]. Испытание свойств покрытий на базе ОЗС проводили не менее чем через 120 ч после нанесения и сушки при температуре +20–25 °С и влажности 70–75 %, помещали в муфельную печь, предварительно разогретую до 250 °С, и выдерживали до окончания процесса вспучивания, одновременно увеличивая температуру в печи в соответствии с утверждённой температурной кривой [112]. После окончания процесса обжига испытуемые образцы после остывания исследовали по утверждённым стандартам и представленными далее новыми методами. Итоги всех испытаний являются средними значениями 3–5 параллельных опытов.

2.2 Измерение толщины слоя огнезащитного покрытия и образовавшегося пенококса

Измерения толщины отверждённого слоя ОЗП в условиях лаборатории выполнялись электромагнитным толщиномером для лакокрасочных покрытий «Константа К5» по ГОСТ 31993-2013 [117]. Этот прибор разработан и используется для измерений толщины ОЗП и зарекомендовал себя точным и надёжным в эксплуатации. При выполнении контрольных замеров в условиях строительной площадки применяли электромагнитный толщиномер «Константа К5». В качестве основного результата измерений принимали среднеарифметическое значение не менее чем 5 замеров при условии среднеквадратичного отклонения до 10 %. Измерения толщины слоя сформировавшегося ПК выполнялись штангенциркулем ШЦ-125 с глубиномером по ГОСТ 166-89 [118]. Штангенциркуль со стержневым глубиномером удобнее и точнее, чем предлагаемая линейка. В качестве альтернативного прибора для измерения толщины ПК в лабораторных условиях возможно применение штангенрейсмаса.

2.3 Определение коэффициента вспучивания образцов

Проводится согласно СП 433.1325800.2019. Огнезащита стальных конструкций. Правила производства работ. [4].

«6.5.2.1. Для испытаний отбирают не более пяти образцов покрытия конструкций на каждые 1000 м² поверхности огнезащитного покрытия с составлением акта отбора образцов. Площадь каждого образца должна быть не менее 2 см²...».

«6.5.3.1. Определение коэффициента вспучивания образцов

Сущность метода заключается в определении коэффициента вспучивания K , который вычисляется как отношение толщины вспененного образца материала (мм), полученного при нагреве в течение не менее 30 мин при температуре (500 ± 25) °С, к первоначальной толщине образца материала до испытания (мм).

Определяют исходную толщину образца микрометром (погрешность $\pm 0,01$ мкм). В капсуле или ином приспособлении для удерживания навесок образцов от расползания образцы помещают в муфельную печь, разогревают ее до (500 ± 25) °С и выдерживают в течение 30 мин. По истечении времени образец извлекают из печи и дают остыть до комнатной температуры. Измерения толщины вспучившегося образца проводятся металлической линейкой (погрешность определения ± 1 мм). Используя полученные данные, вычисляют коэффициент вспучивания по формуле

$$K = \frac{\delta_1}{\delta_0}, \quad (2.1)$$

где δ_0 – исходная толщина образца, мм;

δ_1 – итоговая толщина образца после нагрева, мм.

Испытания проводят не менее чем на трех образцах, за итоговый результат принимается среднеарифметическое значение всех опытов.

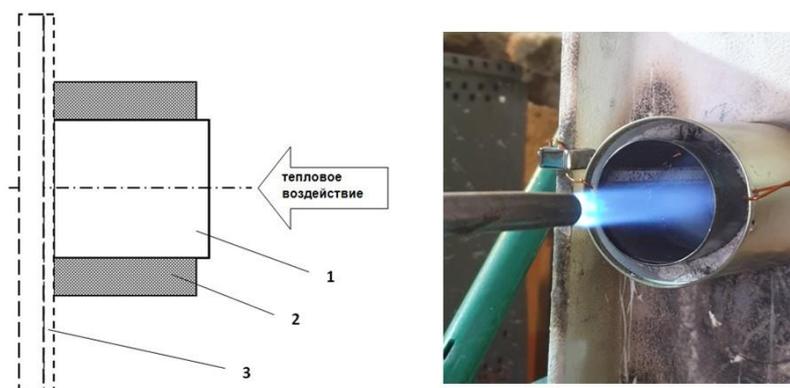
Полученные результаты сравнивают с коэффициентом вспучивания образца-идентификатора. Допускается разница между значениями коэффициентов вспучивания не более 20 %.

6.5.3.2. Вышеописанную методику определения кратности вспучивания и адгезии к металлической пластине с применением муфельной печи следует применять как обязательный тест при входном контроле и периодической проверке огнезащитной эффективности во время гарантийного срока службы огнезащитного покрытия».

2.4 Новые методы исследования качества интумесцентной огнезащиты (методы экспресс-анализа)

Методы, описанные в 2.4.1–2.4.3, являются частью методики контроля параметров ИП на объекте защиты. Метод, при котором производится точечный нагрев тонкослойного ОЗП в местах отбора проб, метод измерения прочности ПК на сжатие, метод измерения величины адгезии ПК (прочности ПК на сдвиг) удобны для реализации непосредственно на конструкциях объекта защиты.

Для получения данных о $K_{всп}$, взамен получения образцов согласно требованиям СП 433.1325800.2019 [4] предлагается выполнять огневые тесты-испытания непосредственно на строительной конструкции объекта защиты. Источником пламени при испытаниях является портативная газовая горелка с баллончиком объёмом не более 0,5 л, наполненным пропан-бутановой смесью, обеспечивающая быстрый нагрев необходимого участка поверхности до 500 °С и выше. Для локализации области нагрева и вспучивания разработана огневая коробка (ОК) (рисунок 2.1).



1 – внутренний цилиндр, 2 – теплоизоляция, 3 – ОЗП

Рисунок 2.1 – ОК для обжига участка ИП на объекте

По окончании огневого воздействия из полученного ПК необходимо вырезать кубик, определить его вес, объём и рассчитать плотность. Коэффициент вспучивания определяют по методике, описанной в разделе 2.3 настоящего диссертационного исследования.

Метод локального нагрева интумесцентного покрытия в местах отбора проб

Для получения необходимых размеров пятна нагрева и минимизации рассеивания теплового потока в процессе нагрева-обжига участка ОЗП предложены и испытаны образцы специальной ОК (рисунок 2.1) с возможностью фиксации на строительных конструкциях разной конфигурации.

Предлагается использовать ОК совместно с источником тепла (огневым нагревом) при контроле параметров вспучиваемости ОЗП как во время строительных работ, так и в процессе эксплуатации объекта в рамках контроля состояния ОЗП ответственными лицами эксплуатирующей организации и в рамках осуществления надзорной деятельности непосредственно на объекте в любую погоду.

ОК разработана для следующих целей:

- а) локализации воздействия пламени;
- б) уменьшения теплоотдачи;
- в) придания формы образцу;
- г) экономии горючего.

При выборе источника нагрева были рассмотрены следующие варианты:

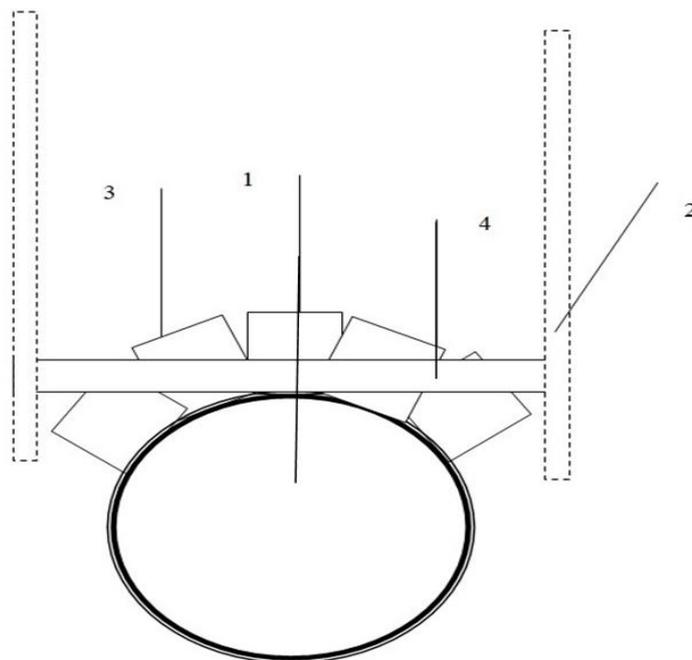
- а) электрический нагрев спиралью с отражателем;
- б) нагрев керосиновой форсункой;
- в) нагрев газовой горелкой с питанием от газового баллончика ёмкостью до 200 см³.

В качестве источника нагрева, исходя из удобства транспортировки (малый вес, отсутствие шлангов и электропроводов), чистоты при использовании (отсутствие дыма), автономности (отсутствие внешних подключений к источникам энергии), была выбрана газовая горелка с питанием от газового малогабаритного баллончика по ГОСТ 26220-84 (СТ СЭВ 4159-83) «Баллоны аэрозольные

алюминиевые моноблочные» с горелкой-насадкой газовой с открытым пламенем средней мощностью 1–1,5 кВт (зарубежного изготовителя).

Разработаны следующие варианты ОК для возможности адаптации к поверхностям разного профиля (плоским и трубчатым).

Вариант 1 – адаптивная ОК (рисунок 2.2).



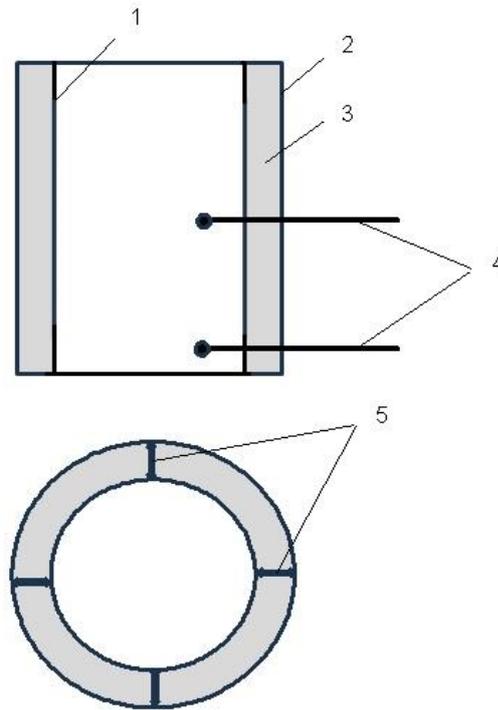
1 – строительный элемент, 2 – корпус; 3 – поворотные щитки, 4 - рамка

Рисунок 2.2 – Схема адаптивной ОК

ОК спроектирована с учётом защиты места испытания как на плоских, так и на криволинейных (трубчатых) поверхностях (например, на трубчатых колоннах). На рисунке 2.2 показано принципиальное устройство ОК на примере трубчатого строительного элемента 1. Основной несущий корпус 2 включает рамку 4, к которой шарнирно крепятся поворотные щитки 3 для создания адаптивной защитной стенки для криволинейных и плоских поверхностей. Такие адаптирующиеся стенки расположены диаметрально противоположно у основания ОК.

Вариант 2 – ОК со сменными кожухами, например, конструкция со сменными стенками с вырезами разных радиусов для плотного прилегания к трубчатым конструкциям разных диаметров. Достоинство такой конструкции – простота и более плотное прилегание к поверхности, недостаток – необходимость иметь набор сменных кожухов с вырезами разных диаметров. ОК (рисунок 2.3)

состоит из внутренней огнестойкой ёмкости 1, которая представляет собой полый цилиндр с толщиной стенок 0,6–0,8 мм.



1 – внутренний кожух, 2 – внешний кожух, 3 – теплоизоляционный материал, 4 – термопары,
5 – винтовые крепления-распорки

Рисунок 2.3 – Схема ОК со сменными кожухами

Одна сторона ОК примыкает к тестируемой поверхности (элементу строительной конструкции с нанесённым и отверждённым ОЗП) 3, а другая сторона открыта для воздействия огня (нагревателя). Наружная боковая поверхность ОК защищена теплоизолирующим слоем из базальтовой ваты марки не ниже М-130, толщиной не менее 10 мм и защитного кожуха, состоящего из аналогичного внутренней части материала 2. Корпуса механически соединяются распорками в виде шпилек с гайками или саморезами по металлу. Материал стенок: жёсть холоднокатаная белая листовая или рулонная по ГОСТ 13345-85 толщиной 0,36 мм.

Вариант 3 – набор ОК с различными внутренними диаметрами ($30 < d < 100$ мм).

Различные варианты огневых коробок могут применяться в зависимости от особенностей объектов. Вариант с адаптирующимися шторками – на объектах с большим ассортиментом трубчатых элементов, вариант со сменными кожухами –

там, где сравнительно мало трубчатых элементов или они все одного диаметра, вариант с набором коробок – универсальное применение. Размеры ОК показаны на рисунке 2.4.

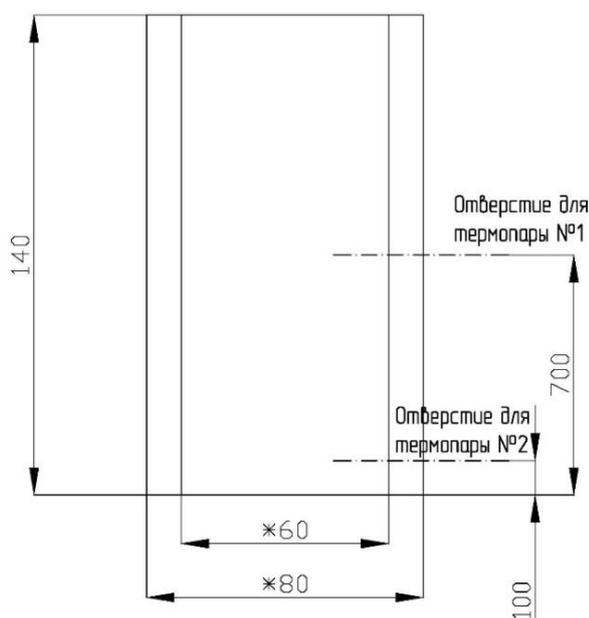


Рисунок 2.4 – Размерные характеристики ОК (кожух защитный)
 (*Размеры сечения могут быть изменены не более чем на 50 %
 при сохранении пропорции между внутренним и внешним кожухом)

При огневом нагреве места тестирования в ОК важным является контроль температуры, чтобы исключить как недостаточный, так и чрезмерный нагрев. Для этого в ОК встраивается термопара как наиболее доступный, надёжный и безопасный датчик, имеющий очень малую инерционность, т.е. быстро остывающий или нагревающийся. При испытаниях использовали термопару в комплекте цифрового мультиметра Mastech MY62 13-2019. Проверка термопары на соответствие показаниям производилась нагревом параллельно с образцовым прибором в соответствии с ГОСТ 8.338-2002 «Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки». Мультиметр был поверен до продажи по ГОСТ 14014-91 (Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний). Показания температуры во время опытов фиксировали вручную, затем вносили в таблицу Excel.

Методика работы с ОК и источником огня:

1. Определяют участок ОЗП для вспучивания, визуально оценивают состояние ОЗП.

2. ОК устанавливают в месте предполагаемого нагрева и закрепляют на поверхности (механическими зажимами или магнитами).

3. В ОК устанавливают датчик температуры и подсоединяют к фиксирующему прибору.

4. Включают отсчёт времени нагрева.

5. Зажигают источник пламени и производят нагрев в течение не менее 5 минут с момента начала реакции плавления и до окончания процесса образования пенококса, который контролируется визуально.

6. Визуально оценивают состояние ИП, его трансформацию в ПК.

7. Регистрируют температуру и время нагрева.

8. По истечении требуемого времени факел выключают и ОК убирают.

9. Определяют внешний вид и состояние ПК.

Локальный нагрев участка с ИП при формировании ПК выполняется в соответствии с графиком (рисунок 2.5) и контролируется визуально до окончания образования пенококса.

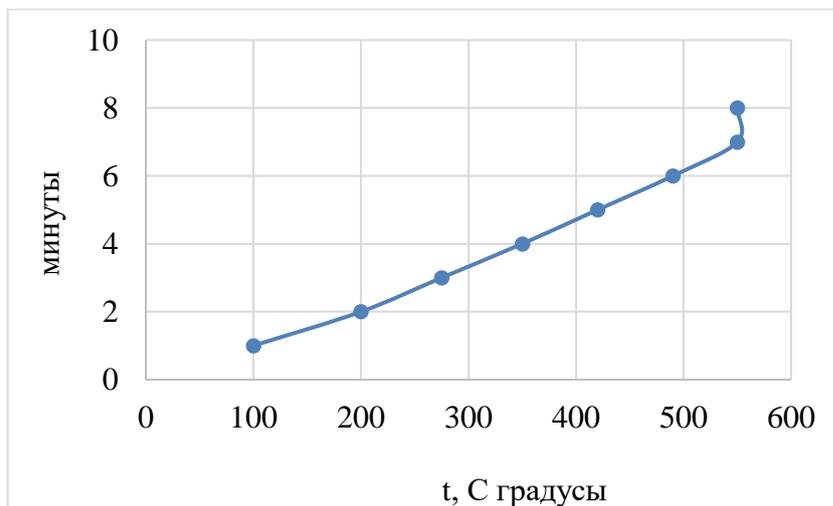


Рисунок 2.5 – График изменения температуры в ОК при формировании ПК

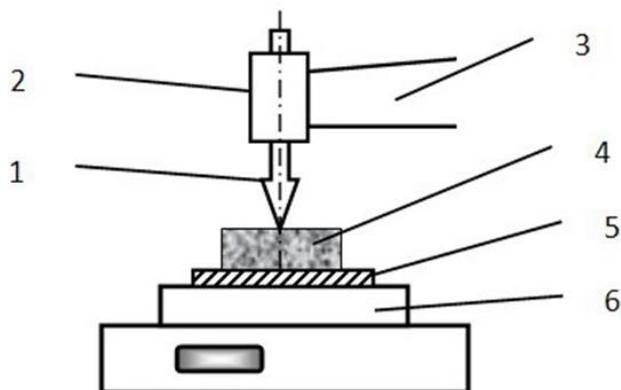
Метод пенетрометрии для оценки прочности пенококса

С целью получения данных о прочности ПК на сжатие и сдвиг применен метод пенетрометрии. Лабораторные исследования выполнялись с помощью

универсального оборудования, адаптированного для данного вида экспериментов, и настольных весов 2-го класса точности.

Прочность ПК определяли на аналогичной лабораторным пенетрометрам установке. К вырезанному образцу пенококса, размещённому на испытательном устройстве, посредством сменного наконечника прикладывали силу, значение которой фиксировали динамометром. При горизонтальном расположении образца измеряли силу пенетрации или внедрения индентора (рисунок 2.6), при вертикальном расположении – силу сдвига ПК (рисунок 2.7).

Для получения данных о прочности на сжатие на весы *б* устанавливают пластинку *5* с образцом ПК *4*. Стержень-индентор *1* с плоским наконечником из легированной стали ($d = 3$ мм) с помощью устройства с микрометрическим винтом *2*, закреплённым на кронштейне *3*, механически не связанным с весами *б*, необходимо перемещать по вертикали.



1 – индентор, 2 – микрометрический винт, 3 – кронштейн, 4 – образец ПК,
5 – пластина-держатель, 6 – весы

Рисунок 2.6 – Схема измерения силы внедрения индентора в образец ПК

Измеряемый параметр отражает следующие физические величины:

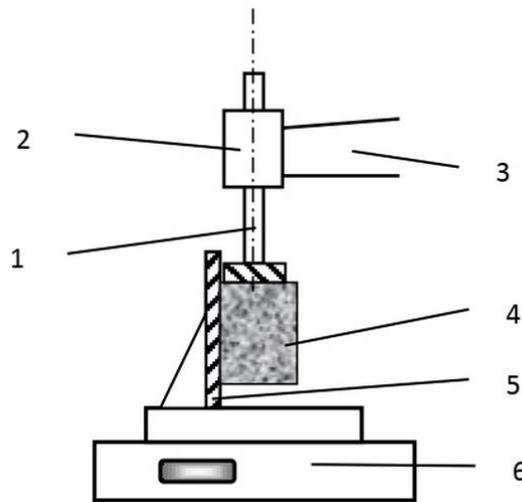
1. Сила вдавливания на определённую глубину (размерность – г·с). При этом по умолчанию должен использоваться индентор со стандартизированной площадью сечения.

2. Удельная сила вдавливания при погружении индентора на определённую глубину (размерность – г·с/см²). Величина соответствует разрушающему

напряжению и относительно мало (в пределах площади сечения участка ПК) зависит от площади индентора.

Особенностью ПК является хрупкость и малая прочность, что делает сложным отрыв ПК от защищаемой поверхности. Поэтому в качестве измеряемого параметра выбрана величина условной адгезии, фактически соответствующая силе сдвига вспученного ПК с отрывом его от защищаемой поверхности.

Для получения данных о силе сдвига ПК установку, показанную на рисунке 2.5, модифицировали (рисунок 2.7).



1 – шток с упором, 2 – микрометрический винт, 3 – кронштейн, 4 – образец ПК,
5 – пластина-держатель, 6 – весы

Рисунок 2.7 – Схема измерения силы сдвига образца ПК

Пластинку-держатель 5 с образцом ПК 4 следует вертикально разместить на весах 6. С помощью устройства микроподачи с микрометрическим винтом 2 необходимо обеспечить передвижение вниз по вертикали штока индентора 1 со сменным плоским наконечником. Индентор 1 следует переместить до соприкосновения с поверхностью ПК так, чтобы на весах установился 0. Затем индентор 1 с помощью вращения микрометрического винта опускают и вдавливают в ПК 4 до достижения сдвига образца.

При помощи весов получали данные о силе сдвига, а устройство микроподачи позволяет получить данные о глубине сдвига. Необходимо зафиксировать данные силы сдвига на весах до наступления момента отрыва ПК.

Усилие, зафиксированное в момент отрыва образца ПК, принимается за разрушающее и зависит от площади его сдвига (размерность – $\text{г}\cdot\text{с}/\text{см}^2$).

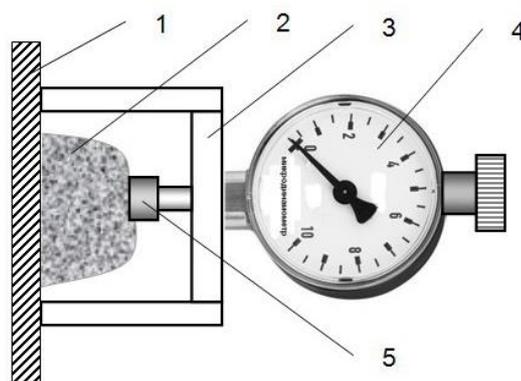
Для перевода измеренных величин сил внедрения индентора и сдвига в СИ применяли формулу:

$$F(H) = \frac{f (\text{г}\cdot\text{с}) \cdot 9,8 (\text{м}\cdot\text{с}^{-2})}{1000} \quad (2.2)$$

Погрешность результатов измерений не превышала 5%.

Метод экспресс-анализа прочности пенококса на сжатие и на сдвиг

На рисунке 2.8 схематично представлено разработанное авторами устройство для измерения силы внедрения индентора в образец, полученного в условиях объекта защиты при обжиге с применением ОК (см. п. 2.4.1 настоящего диссертационного исследования).



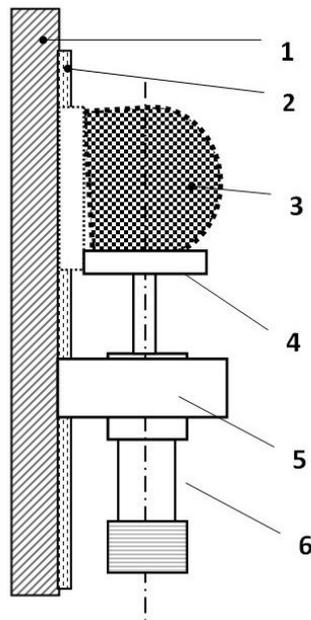
1 – металлоконструкция, 2 – ПК, 3 – рамка, 4 – микродинамометр, 5 – индентор

Рисунок 2.8 – Схема установки для измерения силы внедрения индентора в образец ПК

Рамку 3 с закреплённым микродинамометром 4 со сменным индентором 5 устанавливают на поверхности металлоконструкции 1 над слоем пенококса 2. Обеспечив перпендикулярное к поверхности покрытия образца расположение штока-индентора, выполняют измерение силы и фиксируют результат. Предел прочности определяется как результат деления значения силы, полученного при испытании, на площадь рабочей поверхности индентора.

Для экспресс-оценки величины условной адгезии ПК (силы сдвига ПК) на объекте защиты разработано устройство, которое устанавливается сбоку участка со

вспученным слоем ИП (рисунок 2.9). Для испытания прибор закрепляют на строительной конструкции. Крепёж обеспечивают посредством узла 5, прибор размещают параллельно поверхности конструкции 2, на которой предварительно сформирован участок с ПК 3, на расстоянии от поверхности металла примерно 3–5 мм. Шток с площадкой 4 передвигают параллельно поверхности ИП, визуальное контролируя равномерное вдавливание индентора в ПК до момента отрыва образца ПК. В момент отрыва ПК или его разрушения, без отрыва массива, фиксируют прилагаемую силу микродинамометром 6. При условии точного определения площади зоны отрыва или разрушения рассчитывают предел прочности ПК на сдвиг.



1 – металлоконструкция, 2 – слой ИП, 3 – ПК, 4 – шток с упором, 5 – узел для крепления,
6 – микродинамометр

Рисунок 2.9 – Схема установки для измерения силы сдвига образца ПК

На рисунках 2.8 и 2.9 крепления приборов к поверхности конструкции не показаны. Приборы необходимо закрепить на рёбрах элементов строительной конструкции с применением зажимов типа струбцин или сильными магнитами (если возможно), которые являются сменными, с зажимами. Допускается как вертикальная, так и горизонтальная установка прибора, в т.ч. на конструкциях перекрытий и покрытий. Микродинамометры (разных типов) на рисунках 2.8 и 2.9 показаны условно. Наиболее удобна цифровая фиксация данных

микродинамометра по схеме «сила – перемещение». За разрушающую принимали силу, необходимую для проникновения индентора в ПК на фиксированную глубину 3 мм с целью исключения влияния на результаты измерений возможной «корки» на поверхности ПК (в условиях огневого воздействия на большей части поверхности ПК формируется твёрдая оболочка). Были испытаны инденторы из легированной стали двух типов: стержень диаметром 3 мм и квадратный штамп с размерами площадки индентора 12×12 мм. Скорости погружения инденторов составляли 0,5–1 мм/с.

Достоверность выполненных измерений обеспечивали как минимум пятикратным повторением каждого эксперимента и использованием интумесцентных красок разных партий и срока хранения.

2.5 Математические методы планирования эксперимента и обработки результатов

Планирование эксперимента проводили по плану первого порядка. Использовали расширенную матрицу полного 3-х факторного эксперимента, представляющую собой систему опытов, содержащую все возможные неповторяющиеся комбинации двух (верхнего и нижнего) уровней факторов [119]. Необходимое количество опытов (N) составляет:

$$N = 2^k, \quad (2.3)$$

где k – число влияющих на результат (функцию отклика) факторов.

Влияющими факторами являлись объемная доля разбавителя в краске, толщина слоя краски, время обжига образца. Функции отклика – коэффициент вспучивания ПК и сила внедрения индентора в ПК.

Для каждого фактора определяли шаг варьирования по формуле:

$$\Delta X_i = \frac{X_i^{max} - X_i^{min}}{2}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.4)$$

Значение верхнего уровня фактора в матрице соответствует (+1), нижнего уровня – (-1), среднего (нулевого) уровня – (0).

Для выявления и описания зависимостей между случайными величинами по экспериментальным данным был применён метод регрессионного анализа. Уравнение регрессии для полного 3-х факторного эксперимента:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1X_2X_3, \quad (2.5)$$

где b_i – коэффициенты уравнения регрессии,

X_i – независимые переменные (факторы).

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали по формуле [119]:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}Y_j \quad (2.6)$$

Коэффициент b_i – скалярное произведение столбца X_i на соответствующий столбец Y (экспериментальное значение функции отклика) в матрице планирования, деленное на 8 (число опытов).

Каждый эксперимент по плану повторяли не менее 3-х раз. Дисперсию воспроизводимости вычисляли по результатам 3-х параллельных опытов:

$$s_{\text{воспр}}^2 = \sum_{u=1}^3 (Y_u - \bar{Y})^2 / 2, \quad (2.7)$$

где Y_u – значение функции отклика,

\bar{Y} – среднее значение по параллельным опытам.

Значения коэффициентов уравнения регрессии характеризуют вклад соответствующего фактора в величину Y . Оценку значимости коэффициентов проводят по t -критерию Стьюдента.

Определяли величину среднего квадратичного отклонения:

$$s_{bi} = s_{\text{воспр}} / \sqrt{N}. \quad (2.8)$$

Далее критерий Стьюдента рассчитывали для каждого коэффициента:

$$t_i = |b_i| / s_{bi}. \quad (2.9)$$

Если значение критерия t_i больше табличного $t_{\text{табл}}$, то коэффициент b_i принимается значимым. При уровне значимости $p = 0,05$, числе степеней свободы $f = k - 1 = 2$, $t_{\text{табл}} = 4,3$.

Адекватность уравнений регрессии оценивали по критерию Фишера (F) (отношению остаточной дисперсии к дисперсии воспроизводимости):

$$F = s_{\text{ост}}^2 / s_{\text{воспр}}^2, \quad (2.10)$$

$$s_{\text{ост}}^2 = \sum_{j=1}^8 (Y_j - \bar{Y}) / N - l, \quad (2.11)$$

где l – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Значение критерия Фишера определяется значениями степеней свободы f_1 и f_2 .

$$f_1 = l; \quad (2.12)$$

$$f_2 = N - l - 1, \quad (2.13)$$

Если значение критерия F больше табличного $F_{\text{табл}}$, уравнение регрессии является адекватным в заданных интервалах величин выбранных факторов.

2.6 Микроанализ структуры пенококса

Микроструктуру ПК, сформированную в результате обжига образцов с ИП, изучали с помощью оптического микроскопа БМИ-1 (увеличение $\times 100$). Для фиксации изображений применяли цифровую камеру Delta Optical DLT-Cam 2.0 МП. Поверхности срезов образцов ПК подготавливали посредством острого лезвия или тонкой стальной проволоки.

2.7 Выводы по главе 2

Важным вопросом при разработке методики контроля параметров интумесцентных ОЗП металлических конструкций с целью применения на объектах защиты являлся выбор огнезащитных материалов для выполнения экспериментальных работ. В результате анализа известных ОЗС были выбраны интумесцентные краски марки «Defender», производимые ООО «Лаборатория «Евростиль», на стирол-акриловом и эпоксидном связующих на базе системы «полифосфат-меламин-пентаэритрит», которые широко известны и имеют параметры, аналогичные большинству используемых красок.

При проведении исследований применяли стандартные методики подготовки образцов с ИП и их лабораторного обжига по методике ВНИИПО [111], измерения

толщины слоя огнезащитного покрытия и образовавшегося пенококса согласно ГОСТ, определения коэффициента вспучивания образцов согласно СП [4].

Наряду с известными методами в данной главе представлены новые методы исследования качества интумесцентной огнезащиты: метод локального нагрева тонкослойного ОЗП в местах отбора проб, метод измерения прочности ПК на сжатие, метод измерения величины адгезии ПК (прочности на сдвиг). Эти методы являются частью методики контроля параметров ИП на объекте защиты. Для реализации метода локального нагрева ИП на объекте защиты разработана ОК. Источником пламени при испытаниях является газовая горелка, обеспечивающая быстрый нагрев выбранного участка поверхности до 500 °С и выше. Предложены различные варианты ОК для возможности применения на поверхностях разного профиля. Разработаны устройства для измерения силы внедрения индентора и величины условной адгезии (силы сдвига) образца ПК, полученного при обжиге с применением ОК.

Разработанные методы в совокупности со стандартными методами позволяют получать данные о коэффициенте вспучивания, плотности и однородности структуры ПК на срезе, прочности ПК при разных видах нагружения. Новые методы задействованы в последующих главах настоящего диссертационного исследования и являются основой для разработки методики контроля параметров интумесцентных огнезащитных покрытий металлических конструкций с целью применения непосредственно на объектах защиты.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТУМЕСЦЕНТНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ НА ОБЪЕКТЕ ЗАЩИТЫ

3.1 Причины и виды нарушений качества интумесцентной огнезащиты

В разделе рассмотрены причины наиболее частых нарушений качества и особенности формирования ПК, перечислены возможные мероприятия для повышения надежности интумесцентной огнезащиты.

На рынке представлено большое количество огнезащитных красок, которые фактически не всегда соответствуют требованиям указанных выше стандартов и данным, указанным в сопроводительной технической документации. В некоторых случаях это является следствием попыток экономии на необходимых компонентах красок, из-за чего краска не обеспечивает устойчивый угол распыления, сильно стекает с вертикальной поверхности, не образует пористого ПК с заявленным коэффициентом вспучивания. В других случаях поведение ИП в лабораторных условиях автоматически переносится на реальные производственные условия. В отдельных случаях в технической документации заметно занижен удельный расход краски для привлечения потенциальных клиентов и для получения возможности выиграть тендер. При этом низкое качество материала хотя бы по одной из описанных причин приводит к убыткам для организации, применяющей такой огнезащитный материал, в худшем случае, владельцы зданий и сооружений становятся пострадавшими при пожаре (так как требуемый нормируемый предел огнестойкости не обеспечен).

Интумесцентная огнезащита существует в двух отличающихся по физическим и химическим свойствам формах: в виде исходного тонкослойного покрытия («классическое» лакокрасочное покрытие) и в виде ПК (пористый теплоизолирующий материал). Эти формы существуют по отдельности, в разное время. ПК появляется только после мощного теплового воздействия на исходное

покрытие. Исходное лакокрасочное покрытие фактически является «заготовкой», «складом реагентов» для получения ОЗП [120]. Определение качества ИП и его теплоизолирующих свойств невозможно только при помощи оценки внешнего вида покрытия, его толщины и величины условной адгезии к подложке (что регламентируется при приёмке объекта).

Одним из значимых стандартизированных параметров соответствия ИП является коэффициент вспучивания, который характеризует возможность получения объемного слоя ПК. Заводы-изготовители интумесцентных красок при испытании своей продукции в лабораторных условиях стремятся к достижению максимального коэффициента вспучивания, позиционируя его как одно из конкурентных преимуществ материала. Прочность и однородность пенококса чаще всего не проверяется. Производство вспучивающихся огнезащитных материалов не требует сложных технологических цепочек, возможно к размещению на небольших производственных площадях, не требует больших затрат на оборудование, в связи с чем на рынке регулярно увеличивается количество предлагаемых интумесцентных красок, что сопровождается серьезными проблемами для потребителей таких материалов:

- присутствие на рынке контрафактной продукции, как правило, несоответствующего качества;
- несоответствие продукции от легальных производителей техническим параметрам, заявленным в технической документации на материал.

Основная опасность применения таких красок состоит в получении покрытий, не обеспечивающих в итоге огнезащиту при пожаре. В нормальном случае нагрев конструкций до критической температуры наступает при превышении длительности теплового воздействия относительно заявленного времени действия огнезащиты. В случае применения низкокачественной интумесцентной краски отказ огнезащиты наступает до истечения заявленного времени вследствие различных дефектов ПК, в том числе не соответствующего технической документации на материал коэффициента вспучивания [121]. Наиболее часто причины неудовлетворительной интумесцентной огнезащиты

связаны со снижением качества краски в процессе ее изготовления или при применении непосредственно на объекте (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Причины нарушения качества интумесцентной огнезащиты

Нередко в процессе изготовления интумесцентной краски с целью экономии средств используется сырьё низкого качества или нарушается компонентная база. При изучении зависимости «состав краски – качество краски – свойства пенококса – качество огнезащиты» прямой связи между качеством краски в части отдельных легко проверяемых показателей и качеством ПК для составов от различных производителей не обнаружено. Однако можно утверждать, что в случае, когда отдельные показатели интумесцентной краски указывают на её низкое качество как лакокрасочного материала, то и формирующийся ПК, как правило, не выполняет своей задачи. Упрощенная схема результатов применения качественной и некачественной интумесцентной краски показана на рисунке 3.2 [121].

Особенностью интумесцентной огнезащиты является её «двойственность», вытекающая из условий эксплуатации: работа покрытия в нормальных условиях эксплуатации и работа этого покрытия, трансформированного в теплоизолирующий материал. Для лучшего понимания функции ИП и его трансформации в огнезащитную пористую структуру процесс можно представить в виде системы последовательных переходов [122]:

- а) интумесцентное лакокрасочное покрытие;
- б) тепловое воздействие (ЧС – возгорание);
- в) образование жидкофазной пенной реакционной зоны;

- г) формирование пенококкса;
- д) сформированный твёрдый пенококкс (ОЗП);
- е) тепловое воздействие при температуре более +700 °С в присутствии кислорода;
- ж) озоление (разрушение) пенококкса;
- з) вынос золы газовыми потоками (разрушение верхнего слоя огнезащиты);
- и) уменьшение толщины ПК – увеличение общей теплопроводности слоя – завершение срока действия огнезащиты.

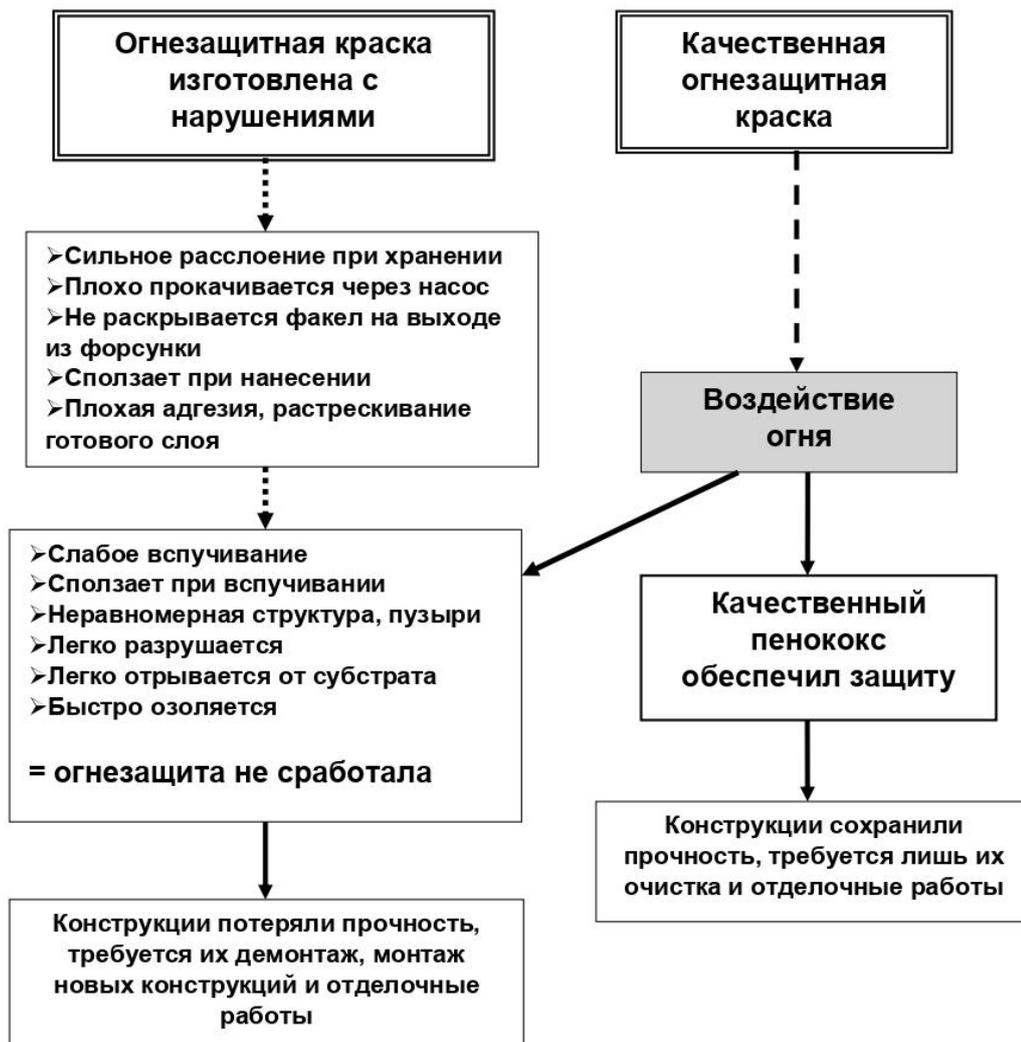


Рисунок 3.2 – Интумесцентная огнезащита в зависимости от качества краски

На рисунке 3.3 представлен типичный разрез вспучивающегося слоя с заметным слоем свежееобразованного ПК и видимой (светлой) пористой зоной реакции [122]. На границе слоя ПК несложно увидеть переходную зону, в которой

начинается процесс формирования углерода из жидкой пены, при сохранении ячеистой структуры и формировании ПК.



Рисунок 3.3 – Пенококк, сформированный из краски Defender M Solvent

При несоответствующем составе краски и, как следствие, процессах в реакционной зоне после огневого воздействия «неправильное» формирование ПК является одной из причин брака интумесцентной огнезащиты [123].

Типичными разновидностями брака ОЗП являются следующие [123]:

- сползание краски с поверхности конструкции в процессе формирования пенококка (рисунок 3.4);
- формирование ПК с неравномерной структурой с крупными газовыми полостями (рисунок 3.5);
- отсутствие процесса вспучивания ИП и образования пористой структуры пенококка (рисунок 3.6);
- низкая величина адгезия к защищаемой поверхности и непрочная структура ПК (рисунок 3.7).



Рисунок 3.4 – Стеkanie интумесцентной краски в процессе формирования ПК



Рисунок 3.5 – Неравномерная структура ПК с крупными порами

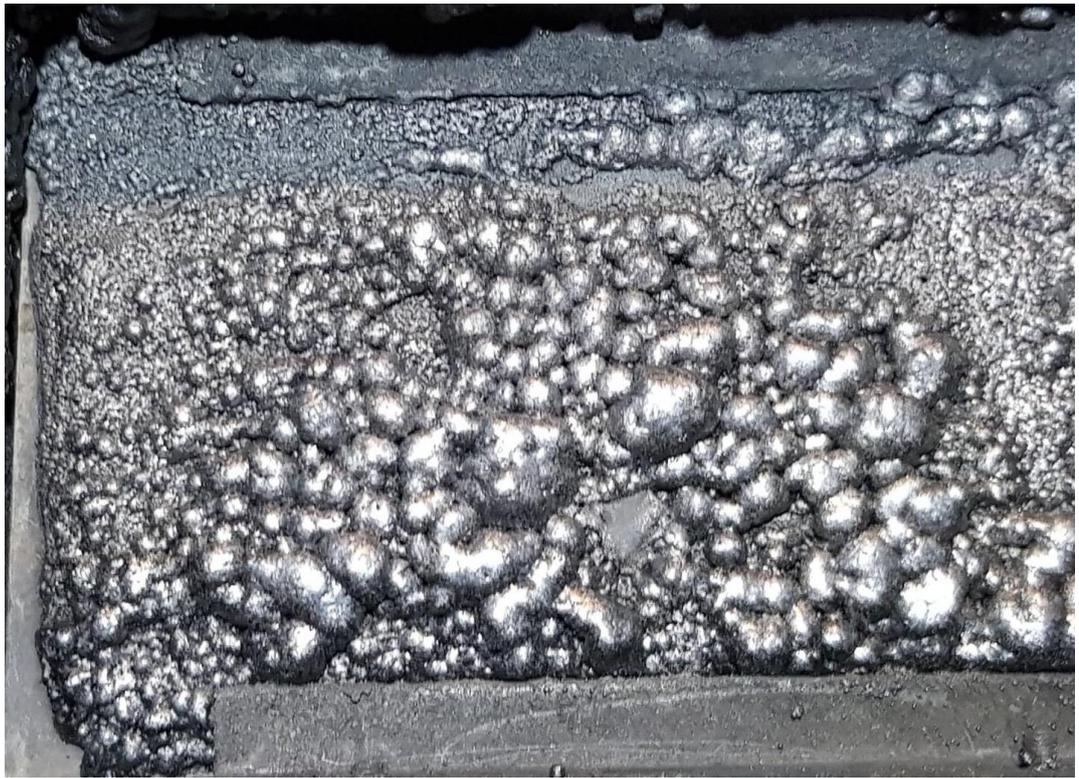


Рисунок 3.6 – Интумесцентная краска не вспучивается, ПК не образуется



Рисунок 3.7 – ПК с непрочной структурой и слабой адгезией к субстрату

Для повышения надёжности огнезащитных красок необходимо:

– обеспечить условия на рынке огнезащитной продукции, при которых будет невыгодно производить некачественные огнезащитные краски;

- выявить и стандартизировать дополнительные показатели качества краски;
- разработать и стандартизировать численные показатели качества пенококса;
- создать небольшой мобильный комплекс для возможности оценки качества краски и пенококса непосредственно на строительном объекте.

Впоследствии необходимо разработать единый стандарт, включающий широкий комплекс требований к ОЗП вспучивающегося типа, в том числе необходимые и достаточные требования к пенококсу.

Обоснование и целесообразность применения дополнительных показателей оценки качества ПК и разработка способов оценки качества интумесцентной огнезащиты представлены в последующих разделах.

3.2 Проблемы методов испытания на огнестойкость интумесцентных покрытий

Важной проблемой являются многочисленные вопросы, связанные с существующими методами испытания на огнестойкость ИП [18, 116]. Предлагаются различные комплексные подходы и методологии с целью изучения эффективности вспучивающихся покрытий, подвергающихся воздействию различных условий нагрева и пожара [90, 124, 125].

По требованиям СП с целью испытаний огнезащитного покрытия на объекте защиты предлагается вырезать образец покрытия непосредственно с поверхности защищаемой конструкции и произвести его вспучивание в какой-либо огнестойкой посуде. Испытание производится в муфельной печи, в лабораторных условиях, т.е. вне объекта. Описание испытаний согласно СП приведено в разделе 2.3 настоящего диссертационного исследования.

По методике, представленной в СП, имеется ряд замечаний.

Прежде всего, вырезание весьма малых участков краски без их разрушения достаточно трудоёмко, особенно если краска отличается хорошей адгезией.

Образцы, как правило, получаются разрушенными, что объясняется адгезией и жёсткостью покрытия. (Надо заметить, что ИП в случае пожара на объекте защиты не будет работать малыми участками, и вспучивание будет происходить в иных условиях.) Частицы краски, согласно СП, предлагается поместить в огнеупорную посуду с целью минимизации возможности их расползания при нагреве. Но именно это свойство интумесцентной краски может оказаться критическим в реальной ситуации на объекте защиты. Если тонкослойное ОЗП в процессе формирования пенококса начинает сползать или расплываться, то при этом фрагменты конструкции оголяются, и огнезащита на этих участках не обеспечивается. Кроме того, в процессе проведения испытаний в лаборатории замечено, что «расползающийся» ПК имеет обычно низкий коэффициент вспучивания – менее 10.

При проведении оценочного анализа ряда интумесцентных красок по методике ВНИИПО [111] с использованием муфельной печи, а также при нагревании газовым факелом в специальном приспособлении нами обнаружены значительные расхождения заявленной и реальной кратности пенококса [126]. Кратность вспучивания слоя ИП толщиной 1 мм (после высыхания) в ряде случаев оказалась 8–12, в то время как было заявлено не менее 25–35. У самых худших образцов кратность была в пределах 1,25–1,5 [126]. Такие материалы совершенно не соответствуют требованиям ГОСТ Р 53295-2009 [111].

Кроме этого, в лабораторных условиях сформировавшийся по внешним признакам ПК может иметь значимые скрытые недостатки, например, низкую прочность и неоднородность структуры. Нельзя при этом проверить поведение ПК на вертикальной поверхности (имеется в виду его способность «сползать» при нагреве). Вышеуказанные замечания, возникающие в плане испытаний ИП, побудили обратить внимание на неявные дефекты интумесцентных красок и пенококса.

Таким образом, особенности формирования ПК, зависящие от толщины слоя наносимой огнезащитной краски и ее разбавления перед применением на объекте, требуют дополнительного изучения в целях выявления скрытых дефектов тонкослойной огнезащиты.

Дополнительно следует сделать акцент на нестандартизированные особенности применения:

– в современных стандартах отсутствует однозначная методика, регламентирующая определение потерь при нанесении (особенно высокопроизводительным методом безвоздушного распыления) в зависимости от сложности и доступности металлоконструкций;

– отсутствуют показатели для оценки таких явлений, как, например, «пенококк имеет низкую величину адгезии и легко отделяется от конструкции потоком воздуха (то есть непрочный и не обеспечит защиту)», «прочность и хрупкость пенококка», «скорость озоления пенококка (то есть переход в белую золу, имеющую совершенно другую структуру и не являющуюся хорошим теплоизолятором)» и т.д.

С целью улучшения понимания этих нестандартизированных условий эксплуатации ниже рассмотрено поведение красок (и их производных) на различных этапах работы [127]:

1. Хранение и нанесение. Краска должна сохранять тиксотропность в течение всего гарантийного срока хранения; должна легко перемешиваться; в процессе нанесения на поверхность при условии соблюдения рекомендуемой толщины слоя не должна стекать с вертикальной поверхности; не должна давать большой усадки и трещин.

2. Сформированное покрытие. Требования как к обычным лакокрасочным материалам с добавлением требования хорошей адгезии к декоративному слою (если он есть), а также возможность обеспечивать дополнительные декоративные свойства без специальных покрытий, коррозионную и химическую (морскую), в случае необходимости, стойкость, стойкость к атмосферному воздействию для разных климатических зон.

3. Начало высокотемпературного воздействия. Гарантированное образование зоны реакции, где происходит формирование пенококса. Сохранение ПК на вертикальных поверхностях на плавящемся нижнем слое и стойкость сформировавшегося пенококса к вихревым потокам газов в пламени. Вспучивание должно проходить равномерно по всей поверхности и в определённой (реакционной) части объёма.

4. Продолжение пожара. Должна обеспечиваться равномерная трансформация слоя ОЗП в устойчивый и прочный ПК упорядоченного «сотового» строения, стойкий к заданной температуре и вихревым потокам газов в пламени в течение требуемого временного отрезка.

Перечислим очень важные свойства ПК, которые влияют на огнезащиту:

1. Отсутствие растекания формирующегося ПК на ранней стадии огневого воздействия. Краска не должна давать потеки.

2. Качество адгезии:

– в процессе коксообразования ПК должен достаточно прочно закрепиться на поверхности;

– хорошая адгезия к защищаемой поверхности должна сохраняться и после окончания процесса формирования ПК.

3. Устойчивость к брызгам воды и потокам раскаленных газов и дыма с твердыми частицами (обеспечивается механической прочностью ПК).

4. Структура ПК:

– не допускается наличие крупных пузырей, неупорядоченной, неоднородной структуры;

– не должна быть рыхлой, зернистой, слабосвязанной.

Для оценки указанных свойств следует разработать методику экспресс-анализа, позволяющую осуществлять контроль ОЗП как в лабораторных условиях, так и непосредственно на объекте защиты. Однако в текущих реалиях выполнить такую оценку невозможно в связи с отсутствием стандартов для оценки этих параметров и оборудования, подобного разработанному для экспресс-исследования качества и свойств огнезащитной обработки древесины [128].

3.3 Исследование зависимости коэффициента вспучивания пенококса от толщины слоя интумесцентной краски и от объемной доли разбавителя

Исследована зависимость толщины слоя ПК соответственно коэффициенту вспучивания ($K_{всп}$) от исходного слоя ИП. Установка для испытаний в лаборатории и опытные образцы были изготовлены согласно методике ВНИИПО МЧС России [111]. На рисунках 3.8–3.11 показана зависимость коэффициента вспучивания от толщины слоя краски для четырех разных ИП с разной толщиной исходных слоев. При увеличении толщины слоя краски $K_{всп}$ уменьшается во всех случаях. Характер кривых зависит от вариаций составов красок.

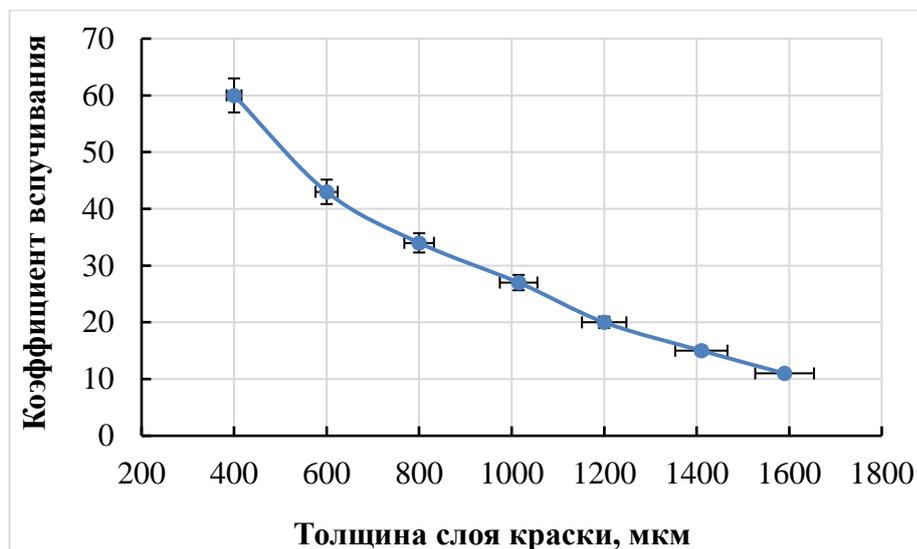


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента вспучивания от толщины слоя ИП «Defender M» на водорастворимом связующем

Наблюдая закономерность, показывающую рост коэффициента вспучивания ПК при снижении толщины слоя ИП, можно сделать вывод о разном распределении массы углеродного связующего по изменяющемуся объёму, т.е. при увеличении плотности ПК коэффициент вспучивания уменьшается. Учитывая, что при вспучивании из реакционной массы уходит некоторое количество вещества в виде газов и дыма, можно говорить, что при сильном вспучивании происходит ослабление структуры ПК. При увеличении слоя ИП одновременно с уменьшением коэффициента вспучивания плотность ПК увеличивается, повышая надёжность

огнезащиты. По нашему мнению, существуют границы оптимальной толщины слоя ИП, несколько различающиеся для разных ОЗС.

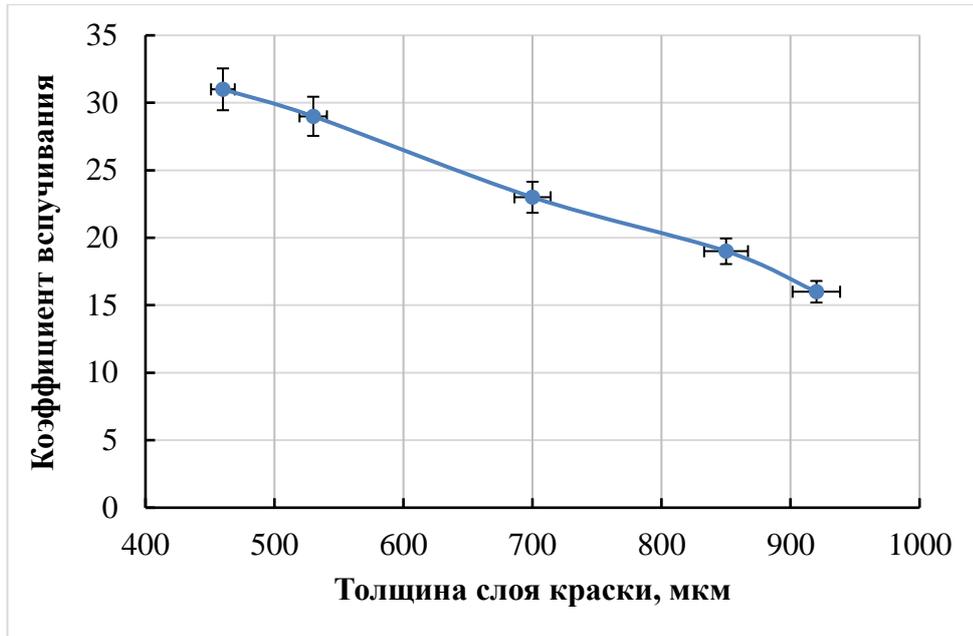


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента вспучивания от толщины слоя ИП модельного состава (краска на связующем марки «Экоформ 2245»)

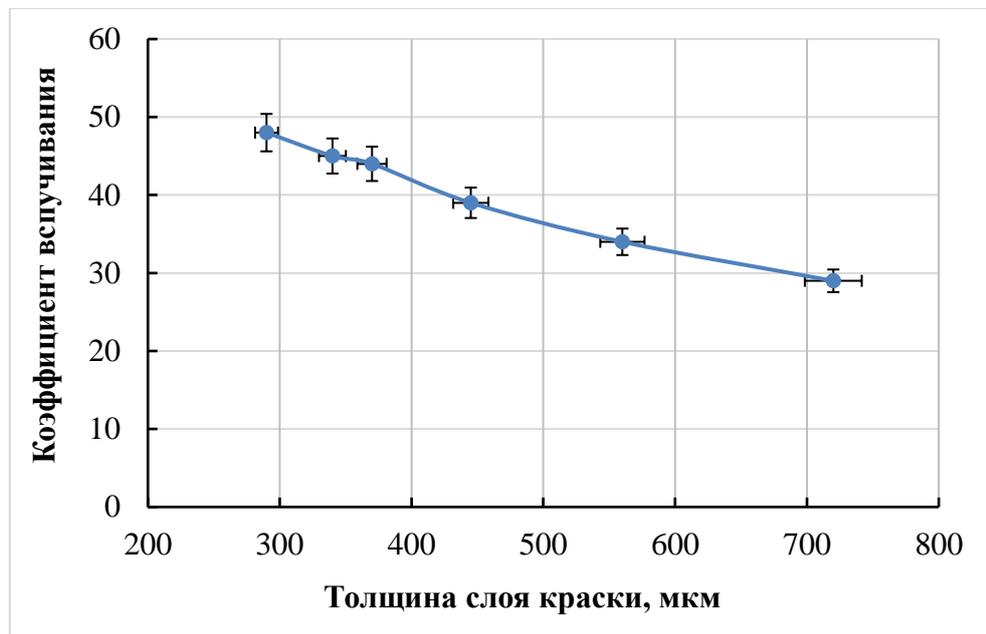


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента вспучивания от толщины слоя ИП «Defender M Solvent» на органорастворимом связующем

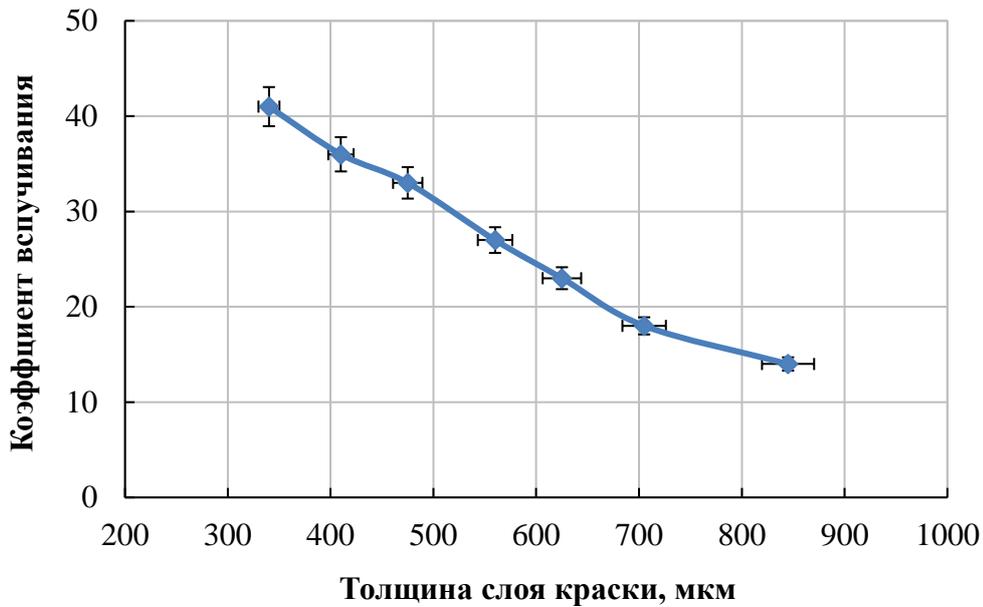


Рисунок 3.11 – Зависимость коэффициента вспучивания от толщины слоя ИП «Defender ME» на эпоксидном связующем

Таким образом, согласно полученным результатам (рисунки 3.8–3.11), увеличение толщины слоя ИП сопровождается понижением коэффициента вспучивания.

На рисунке 3.12 показана взаимозависимость параметров ОЗП. По оси ординат даны толщина слоя покрытия (мм), высота слоя ПК (мм), плотность слоя ПК (г/см^3) и безразмерный коэффициент вспучивания (толщина сухого слоя ИП и плотность ПК условно умножены на 100 для удобства сопоставления параметров), по оси абсцисс – условные номера групп опытных образцов, сгруппированных по высоте слоя ИП. Становится очевидным уменьшение коэффициента вспучивания огнезащитной краски при увеличении исходного слоя покрытия. Но при увеличении толщины слоя одной и той же краски высота сформировавшегося ПК остаётся приблизительно одинаковой, то есть увеличивается его плотность [129].

Эти результаты находят подтверждение, в том числе, в работах [130, 131], где показано, что высокий коэффициент вспучивания ($\times 50\text{--}60$) достигается слоями очень небольшой толщины – 0,1–0,3 мм.

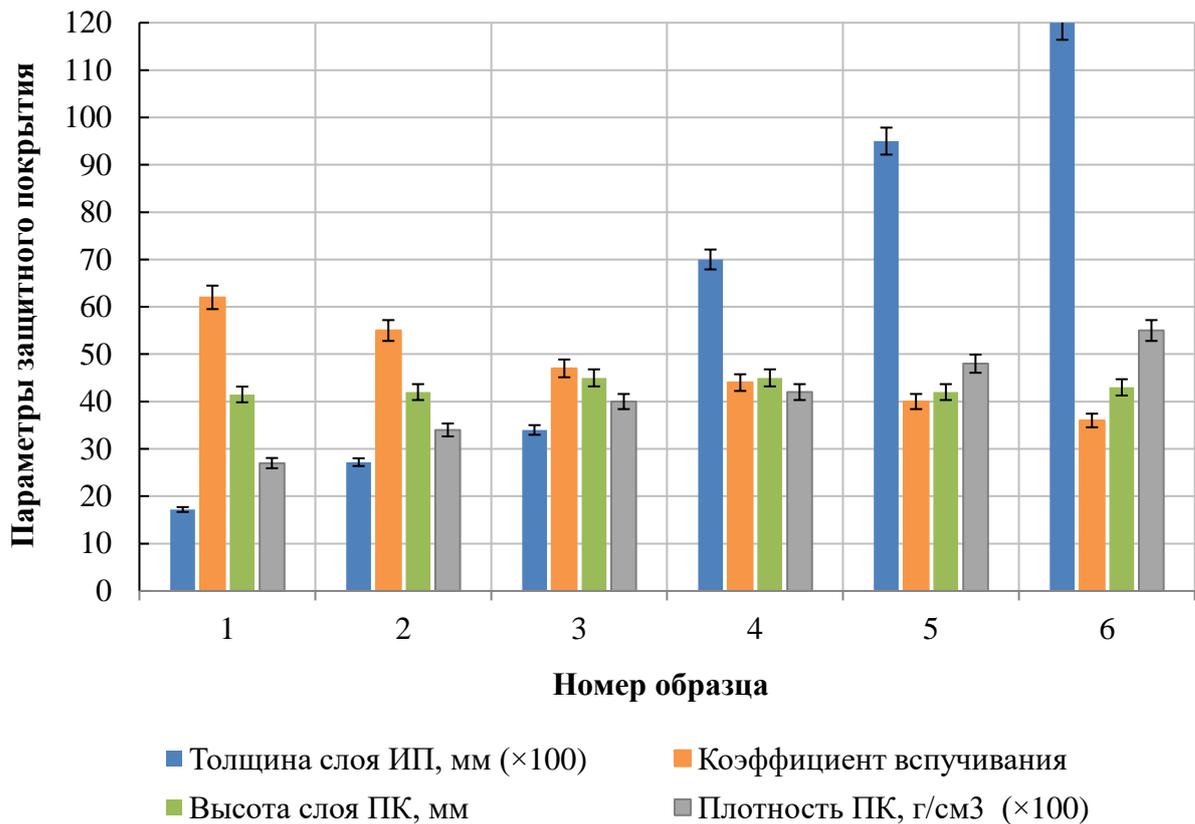


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента впитывания и высоты слоя ПК от толщины слоя ИП «Defender M Solvent»

Отметим, что при больших значениях коэффициентов впитывания, согласно закону сохранения массы (даже без учёта газообразных потерь), плотность ПК становится недостаточной для противостояния механическому воздействию газовых потоков в условиях реального пожара. Этот факт косвенно подтверждается тем, что малые толщины позволяют получить ПК, обеспечивающий защиту конструкции примерно в течение 15 мин. Более толстые слои покрытий приводят к снижению коэффициента впитывания и повышают финансовые затраты на выполнение работ по огнезащите. Поэтому толщина покрытия должна быть оптимальной, одновременно обеспечивать механическую прочность покрытия и требуемую устойчивость к тепловому воздействию после формирования пенококса.

В технической документации на тонкослойные ОЗП отсутствует шкала зависимости коэффициента впитывания от толщины исходного слоя краски. При

этом приводится наилучшая, с точки зрения маркетинга, величина коэффициента вспучивания, без указания исходной толщины сухого покрытия.

Как уже было отмечено в разделе 3.1 настоящего диссертационного исследования, визуально корректно нанесённый слой интумесцентной краски может содержать в себе скрытые нарушения, в том числе излишнее разбавление. Оно производится на объекте на стадии производства работ для корректировки вязкости состава и прохода её через распылительную головку (форсунку) без закупорки последней. Кроме этого, делаются попытки экономии краски. При огневом испытании такого покрытия ПК получается низкого качества или процесс вспучивания не происходит вообще, а из ОЗС образуется тонкий обугленный слой, полностью не соответствующий параметрам, указанным в технической документации на материал (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Влияние избыточного разбавления на свойства ПК
(справа модельный состав краски + 10% разбавителя,
слева краска «Defender M solvent» + 10% орто-ксилола)

Результаты исследования зависимости коэффициента вспучивания от введения в ОЗС разбавителя показывают существенное снижение коэффициента вспучивания

даже при незначительном разбавлении (рисунок 3.14). В качестве разбавителя в этой серии опытов применяли ортоксилол и уайт-спирит. При содержании разбавителя в краске более 2–2,5 об. % коэффициент вспучивания заметно снижается и уменьшается более чем в 2 раза при содержании разбавителя в краске 10 об. %.

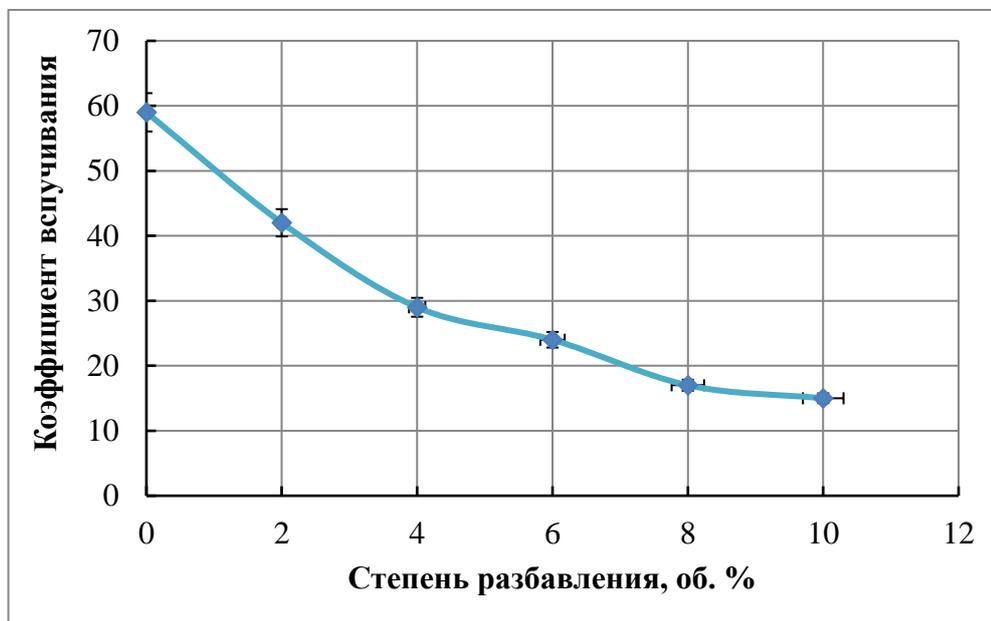


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента вспучивания от объемной доли разбавителя в исходной краске «Defender M Solvent»

Кроме уменьшения слоя ПК, разбавление ухудшает потребительские свойства состава (краска даёт потёки на вертикальных поверхностях – рисунок 3.15, а), покрытие становится более хрупким и даже может местами отслаиваться (рисунок 3.15, б).

Для лучшего понимания причин нарушений свойств ПК следует рассмотреть механизм формирования ПК и его структуры. Некоторые авторы проводили исследования, в которых демонстрируется кинетика образования ПК и соответственно, нагрева стального субстрата, в частности, в работе [132]. Помимо влияния компонентов краски на теплопроводность слоя ПК, были выявлены различающиеся между собой стадии формирования ПК, поскольку химический состав реакционной массы непрерывно изменяется по времени [129].



а)



б)

Рисунок 3.15 – Потёки разбавленной краски (а); отслоение разбавленной краски (б)

При этом для каждой стадии оказалось характерным определённое время и свойства среды. Соответственно, огнезащитная краска, в случае расслоения после нанесения, даст при нагреве нарушенную реакционную систему и, как следствие, некачественный пенококс. Такое поведение краски иногда можно обнаружить при испытаниях в специальной стационарной печи согласно ГОСТ Р 53295-2009 [111], но этот дорогостоящий метод недоступен абсолютному большинству изготовителей и потребителей интумесцентных красок. В процессе обжига образца в печи не всегда понятно, какой из параметров ПК оказался критическим.

Таким образом, можно выделить одним из основных источников нарушения качества огнезащитного состава, допущенного после этапа входного контроля на объекте защиты, излишнее разбавление краски перед нанесением. Ниже перечислены свойства ПК, непосредственно влияющие на огнезащиту, которые не регламентируются в нормативной документации, но являются критическими.

1. На начальном этапе огневого воздействия формирующийся ПК не должен растекаться. Его основная функция – обеспечить максимальное сцепление с поверхностью.

2. После формирования ПК должен сохранять высокую степень адгезии к защищаемой поверхности.

3. Механическая прочность ПК должна обеспечить устойчивость к воздействию потоков раскалённых газов и дыма с твёрдыми частицами, а также к брызгам огнетушащего вещества.

4. ПК должен иметь упорядоченную пористую структуру по всему массиву без отдельных крупных пузырей.

5. Однородная структура ПК не должна быть рыхлой, зернистой, слабосвязанной.

Указанные свойства ПК рекомендуется оценивать непосредственно на объекте защиты, когда покрытие сформировалось и огнезащита готова к эксплуатации. В настоящее время такие исследования не проводятся, т.к. они не стандартизированы, для их оценки нет оборудования, подобного тому, которое было разработано для экспресс-исследования огнезащитных свойств и качества огнезащитной обработки древесины [128].

3.4 Обоснование выбора типа индентора для контроля параметров прочности пенококкса

На начальном этапе в рамках метода пенетрометрии выполнили сравнительные измерения с применением двух типов инденторов для выбора наиболее приемлемого для использования в составе комплекта средств измерений параметров ПК в условиях объекта защиты.

В таблице 3.1 представлены значения сил погружения инденторов двух типов в слой ПК, полученного из краски «Defender M Solvent», в зависимости от плотности ПК. По данным таблицы 3.1 видно, что силы погружения в случае применения квадратного штампа примерно в 20 раз превышают аналогичные показатели при применении стержневого индентора.

Таблица 3.1 – Силы погружения инденторов разного сечения в пенококс различной плотности

Плотность ПК, г/см ³		0,53	0,52	0,48	0,43	0,38	0,29
Сила на инденторе Ø3 мм	г·с	22,0	19,5	10,5	5,8	3,8	2,4
	Н	0,22	0,19	0,10	0,06	0,04	0,02
Сила на инденторе 12×12 мм	г·с	450	400	212,5	120	78	46
	Н	4,41	3,92	2,08	1,18	0,77	0,45

Результаты сравнения контактных напряжений на поверхности индентора (локальных пределов прочности на сжатие ПК) при погружении стержня и штампа на глубину 3 мм отличаются незначительно (таблица 3.2), предположительно, из-за специфических физических свойств ПК, влияющих на сопротивление проникновению предметов разной площади.

Таблица 3.2 – Прочность пенококса разной плотности при погружении инденторов разного сечения

Плотность ПК, г/см ³		0,53	0,52	0,48	0,43	0,38	0,29
Локальный предел прочности ПК при погружении стержня Ø3	г·с/см ²	311,4	276,0	148,6	82,1	53,8	34,0
	Н/м ²	30432	27035	14579	8068	5237	3326
Локальный предел прочности ПК при погружении штампа (12×12)	г·с/см ²	312,5	277,8	147,6	83,3	54,1	31,9
	Н/м ²	30646	27243	14472	8174	5313	3132

В таблице 3.3 указаны величины сил на стержневом инденторе в зависимости от глубины его погружения. Было замечено, что ПК, сформированный на основе образца исследуемой интумесцентной краски, в условиях огневого обжига на большей части поверхности имеет тонкую твёрдую оболочку (корку). На глубине до 0,5 мм происходит пролом «корки» с характерным резким изменением величины усилия внедрения индентора, после чего на глубине 1 мм величина усилия заметно

снижается и при дальнейшем погружении индентора до глубины 3 мм постепенно растёт [88].

Таблица 3.3 – Сила внедрения индентора в ПК в зависимости от глубины погружения индентора

Глубина погружения, мм		0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7
Сила на инденторе Ø3 мм	г·с	60,2	64,1	11,9	18,4	22,3	25,2	26,7	28,6	28,9
	Н	0,59	0,63	0,12	0,18	0,22	0,25	0,26	0,28	0,28

Эти эксперименты помогли определить диапазон величин при измерении параметров ПК и при сравнении типов инденторов определить предпочтительный вариант. Метод пенетromетрии со стержневым индентором минимизирует возможное повреждение поверхности, что особенно важно при последующих испытаниях образцов. В свою очередь, минимальная площадь воздействия увеличивает вероятность погрешности из-за малых величин усилия, в связи с чем для выполнения измерений следует применять высокочувствительный датчик (микродинамометр). Кроме того, в процессе погружении стержня в хрупкий и пористый ПК имеет место не только смятие (сжатие), но и прорезание слоя, что не даёт возможности с высокой точностью сравнивать полученные результаты с результатами, полученными при погружении штампа. Испытание с применением штампового индентора требует гораздо больших усилий и приводит к обширному смятию верхнего слоя ПК. При этом результаты измерений получаются более корректными и чётче различаются между собой. В этом случае удаётся получить меньшую погрешность измерений, чем при использовании стержневого индентора.

Таким образом, оба типа инденторов, и стержневой, и штамповый, пригодны для проведения измерений. Но предпочтительнее использование штампового индентора, так как он более явно выявляет пролом «корки», эффект уплотнения ПК и его разрушение (раскрашивание или раскалывание) для последующей визуальной оценки.

3.5 Исследование физико-механических свойств пенококкса

Как уже было отмечено в разделе 3.2 настоящего диссертационного исследования, ПК с формально соответствующим технической документации параметром (коэффициентом вспучивания) может оказаться непрочным, хрупким, легко разрушающимся при незначительном внешнем воздействии (измеряющимся граммами в условиях лаборатории). Согласно наблюдениям в условиях лабораторного обжига, такой ПК не сохраняет свою целостность даже 15–20 мин и, соответственно, не может служить для огнезащиты выше, чем VII группа огнезащитной эффективности.

Дополнительными параметрами сформированного пенококкса, которые, по нашему мнению, необходимо проверять непосредственно на объекте защиты, являются коэффициент вспучивания, вид ПК на срезе на предмет однородности, прочность ПК.

Для испытанных образцов с разной степенью вспучивания покрытия, полученных из одного образца интумесцентной краски, нанесенной слоями различной толщины, была определена плотность ПК. На рисунке 3.16 показана зависимость плотности ПК от коэффициента вспучивания. При снижении плотности ПК наблюдаются изменения его пористой структуры: уменьшается толщина перегородок между порами и увеличивается общее количество пор, что приводит к снижению прочности пенококкса.

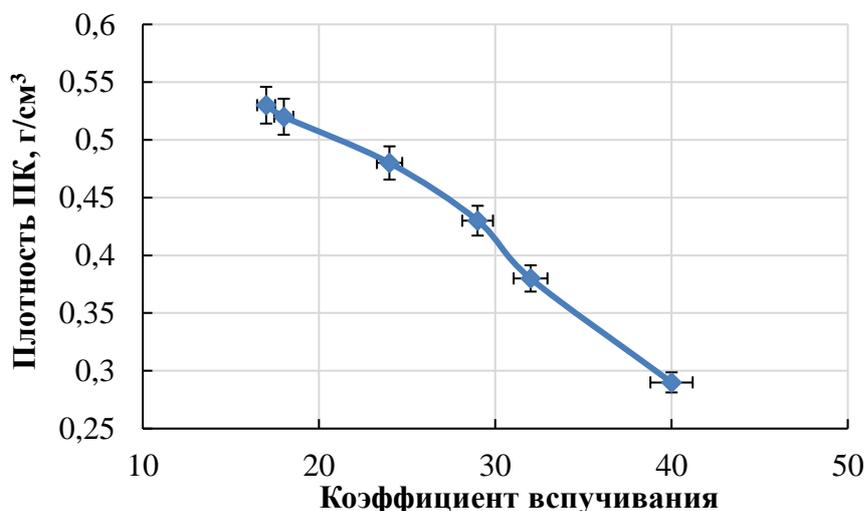


Рисунок 3.16 – Зависимость плотности ПК от коэффициента вспучивания

Для оценки прочности ПК на сжатие была проведена серия опытов [88]:

- с равной глубиной погружения h для получения данных об усилии пенетрации (внедрения индентора) F (рисунок 3.17);
- с постоянной скоростью погружения (при этом регистрировали усилие внедрения индентора F в зависимости от глубины погружения h) (рисунок 3.18).

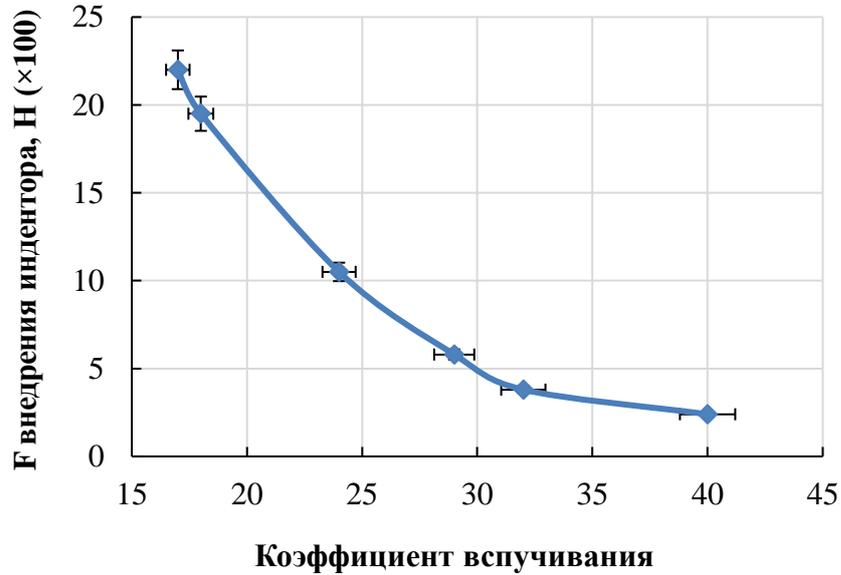


Рисунок 3.17 – Зависимость силы внедрения индентора в ПК от коэффициента вспучивания при глубине погружения индентора 5 мм

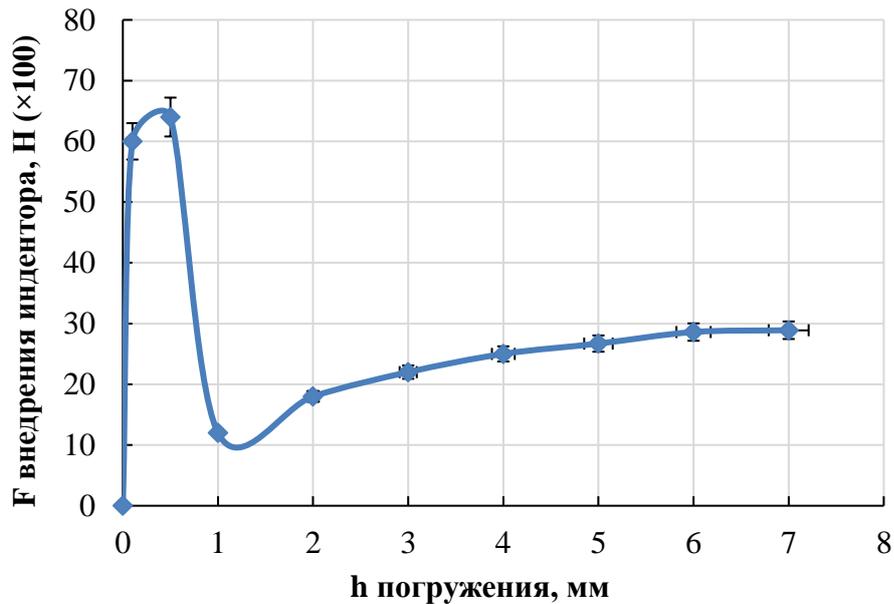


Рисунок 3.18 – Зависимость силы внедрения индентора от глубины погружения индентора в ПК

В момент разрушения твердой оболочки пенококса (корки), сформировавшейся в процессе огневого обжига ИП (см. раздел 3.4 настоящего диссертационного исследования), регистрируется резкое увеличение усилия внедрения индентора, из-за чего сравнение результатов измерений для разных образцов усложняется. В связи с этим измерения усилия внедрения индентора в ПК проводились на заданной глубине (5 мм) от поверхности «корки». Кривая на рисунке 3.17 показывает зависимость прочности на сжатие пористой массы ПК от коэффициента вспучивания для различных образцов ПК.

С целью уточнения зависимости силы внедрения индентора от глубины погружения индентора в ПК проводилась следующая серия опытов. На начальном этапе погружения происходит резкое увеличение показателя силы внедрения индентора, после чего следует аналогичное резкое уменьшение после проламывания «корки» ПК (рисунок 3.18). Далее в процессе погружения индентора усилие снова возрастает, что свидетельствует об уплотнении ПК в нижних слоях.

При сопоставлении данных, представленных на рисунках 3.16 и 3.17, получаем зависимость, показывающую увеличение прочности ПК при увеличении его плотности (рисунок 3.19).

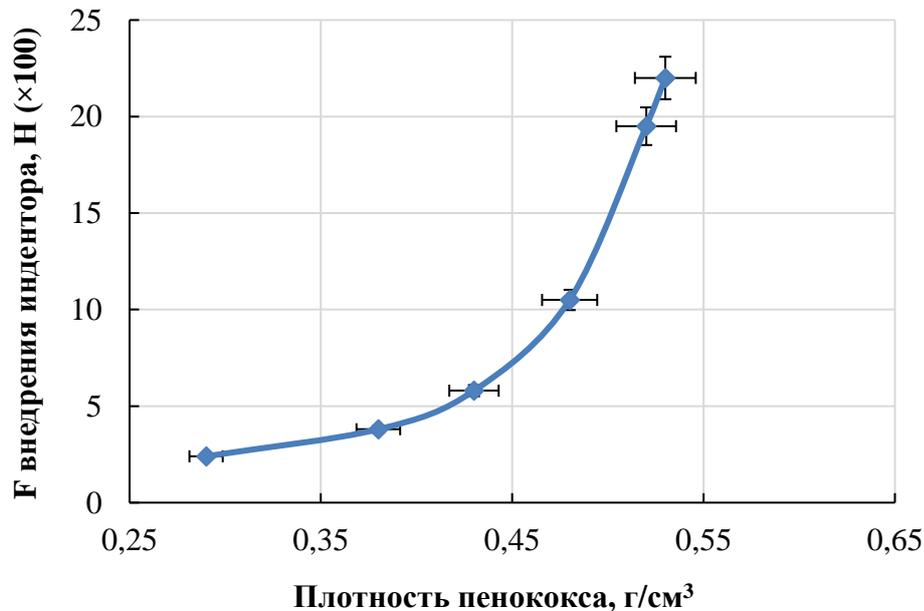


Рисунок 3.19 – Зависимость силы внедрения индентора от плотности ПК

В процессе экспериментов по оценке силы сдвига было замечено, что в большинстве случаев под слоем непосредственно ПК имеется переходный слой, который состоит из невыработанных компонентов ИП. Слой заметно твёрже и обеспечивает сцепление полностью сформированного ПК с защищаемой металлической поверхностью. При определённых усилиях ПК отрывается не от субстрата, а от переходного слоя. При измерении усилий сдвига именно этого переходного слоя для образцов с разными коэффициентами вспучивания были получены величины, в десятки раз превышающие значения, полученные при сдвиге ПК над переходным слоем. В связи с этим опыты, оценивающие усилие сдвига, отрывающего ПК, проводились с поправкой на этот слой. Шток для обеспечения усилия сдвига оказывал воздействие на ПК на расстоянии 2–3 мм от металлической поверхности. Эксперименты, оценивающие усилие сдвига единичного объёма ПК, подтверждают предположение, что при увеличении коэффициента вспучивания прочность ПК на сдвиг также уменьшается (рисунок 3.20).

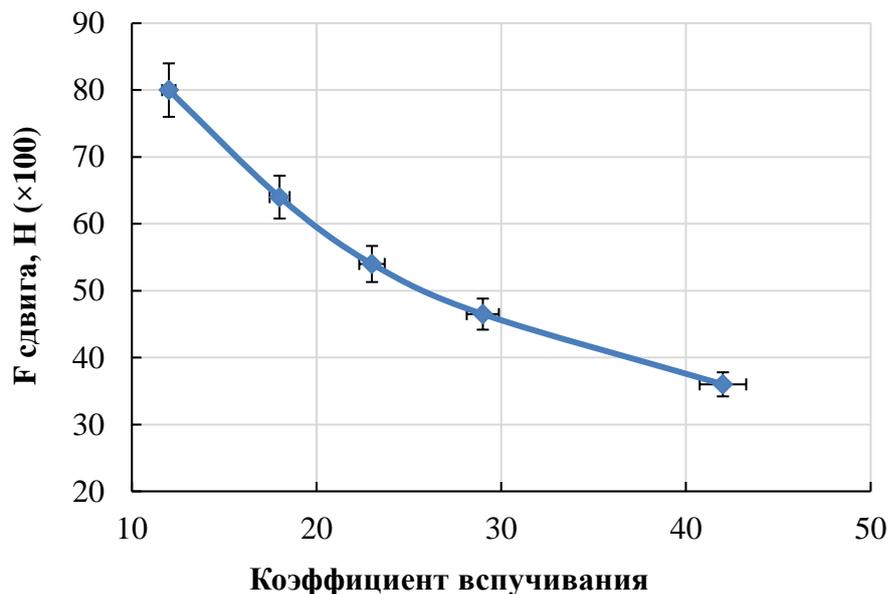


Рисунок 3.20 – Зависимость силы сдвига образца единичного объёма ПК от коэффициента вспучивания

Данные, полученные при измерении силы внедрения индентора в ПК и силы сдвига ПК для красок Defender M Solvent 3-х и 5-ти разных партий соответственно, демонстрируют практически линейное снижение силы, требуемой для внедрения

индентора в ПК и сдвига участка ПК при повышении коэффициента вспучивания (рисунок 3.21, рисунок 3.22).

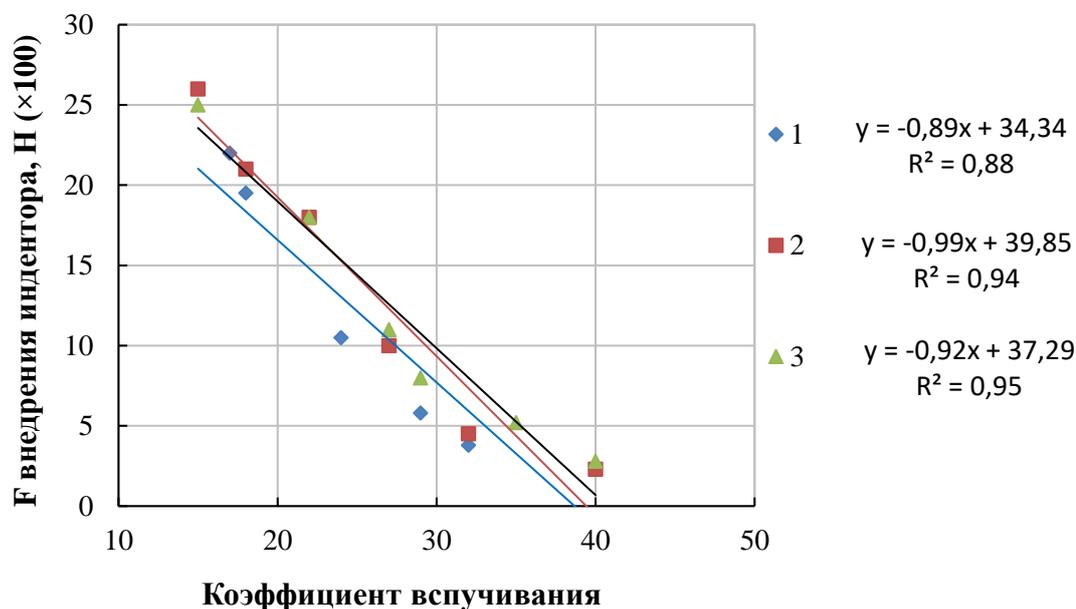


Рисунок 3.21 – Зависимость силы внедрения индентора в ПК от коэффициента вспучивания краски Defender M Solvent 3-х разных партий

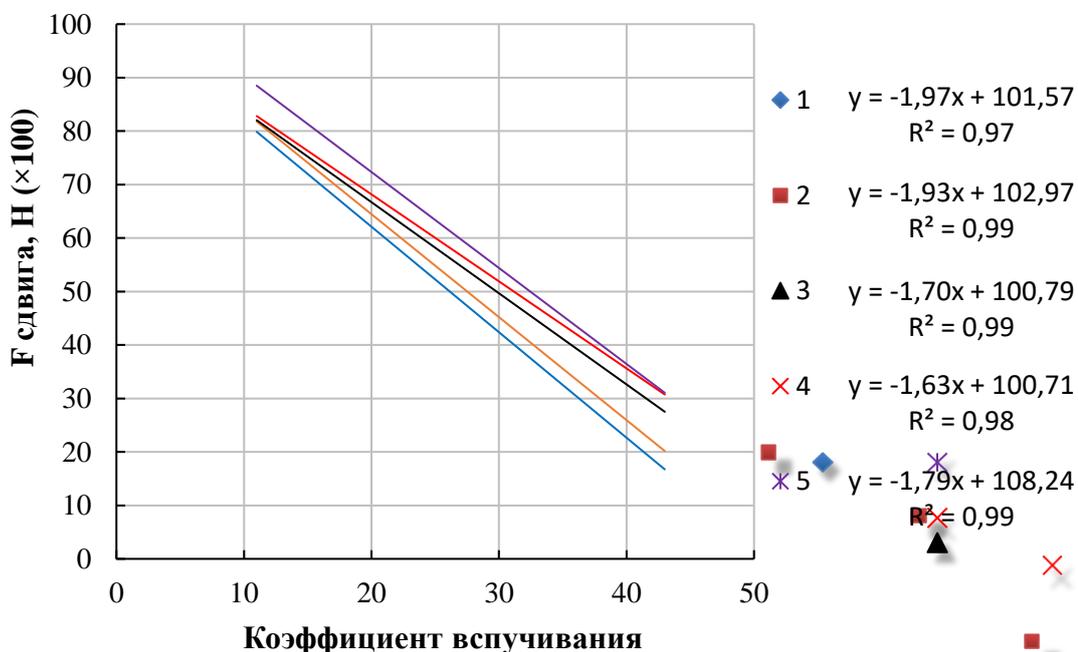


Рисунок 3.22 – Зависимость силы сдвига ПК от коэффициента вспучивания краски Defender M Solvent 5-ти разных партий

Согласно полученным данным увеличение коэффициента вспучивания ПК в 1,5 раза приводит к снижению силы сдвига в 1,5...1,7 раза, сила внедрения

индентора при этом уменьшается в 2,2...3,7 раз. Влияние изменения коэффициента вспучивания на силу внедрения индентора особенно проявляется при малых величинах – до 30, и заметно ослабевает при коэффициентах вспучивания более 35. Различные значения $K_{всп}$ у образцов ПК обусловлены различным содержанием разбавителя (орто-ксилола) в исходном ИП, которое варьировалось в пределах 0–10 об. %.

Оценка влияния условий, предшествующих формированию пенококса, на его основные физико-механические параметры

Для более точной оценки влияния объемной доли разбавителя и толщины наносимого слоя ИП на процесс формирования ПК и построения математической модели процесса применили расширенную матрицу планирования полного трёхфакторного эксперимента [119]. В качестве третьего фактора, оказывающего влияние на качество полученного ПК, приняли фактор времени обжига ПК после достижения температуры 500 °С.

Постоянными условиями эксперимента являлись: состав краски (Defender M Solvent), температурная кривая обжига, защищаемый материал (сталь конструкционная). Факторами варьирования были выбраны: X_1 – объемная доля разбавителя – 4 об. %; X_2 – толщина слоя краски – ~500 мкм; X_3 – время обжига после достижения +500 °С – 35 мин.

Функции отклика: Y – коэффициент вспучивания ПК, Z – сила внедрения индентора в ПК, H .

Условия проведения эксперимента приведены в таблице 3.4. Матрица планирования и средние значения функций отклика – в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Условия проведения экспериментов

Характеристики плана	X_1 , об. %	X_2 , мкм	X_3 , мин
Нулевой уровень	4,0	1000	35
Интервал варьирования	4,0	500	35
Верхний уровень « + »	8,0	1500	70
Нижний уровень « - »	0	500	0

Таблица 3.5 – Матрица планирования и значения функции отклика

№ оп	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	Y _{ср. эксп.}	Y _{расч.}	Z _{ср. эксп.}	Z _{расч.}
1	–	–	–	+	+	+	–	38	37,4	0,24	0,223
2	+	–	–	–	–	+	+	13	15,4	0,12	0,128
3	–	+	–	–	+	–	+	23	22,3	0,205	0,197
4	+	+	–	+	–	–	–	15	13,8	0,155	0,154
5	–	–	+	+	–	–	+	35	33,7	0,23	0,247
6	+	–	+	–	+	–	–	26	25,3	0,16	0,152
7	–	+	+	–	–	+	–	30	32,4	0,165	0,173
8	+	+	+	+	+	+	+	11	10,5	0,13	0,131
9	0	0	0					23	23,9	0,165	0,176

Примечание:
 $X_4 = X_1 \times X_2$, $X_5 = X_1 \times X_3$, $X_6 = X_2 \times X_3$, $X_7 = X_1 \times X_2 \times X_3$;
 $Y_{ср.эксп.}$, $Z_{ср.эксп.}$ – средние экспериментальные значения;
 $Y_{расч.}$, $Z_{расч.}$ – расчетные значения.

После обработки результатов экспериментов получены адекватные уравнения регрессии.

$$Y = 23,9 - 7,3X_1 - 4,1X_2 + 1,6X_3 - 3,4X_1X_2X_3; \quad (3.1)$$

$$Z = 0,176 - 3,5X_1 - 1,2X_2 + 1,3X_1X_2 - 1,2X_2X_3. \quad (3.2)$$

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 указанных факторов (таблица 3.4) при соответствующих пороговых вероятностях ошибки. Таким образом, формированию ПК с высоким значением коэффициента

вспучивания способствуют уменьшению содержания разбавителя в интумесцентной краске, толщины слоя ИП и увеличение времени обжига ПК после его формирования. Прочность ПК при сжатии определяется только двумя из исследованных в системе факторов – объемной долей разбавителя и толщиной слоя краски, а также взаимодействием факторов. Наибольшее влияние оказывает доля разбавителя, меньшее – толщина слоя ИП. Чем ниже численные значения этих факторов, тем выше показатель силы внедрения индентора и прочнее слои ПК.

3.6 Анализ структуры пенококсов в зависимости от условий его формирования

Оптические изображения поверхностей срезов пенококсов, сформированных из красок с разным содержанием разбавителя (орто-ксилола), представлены на рисунках 3.23–3.25.

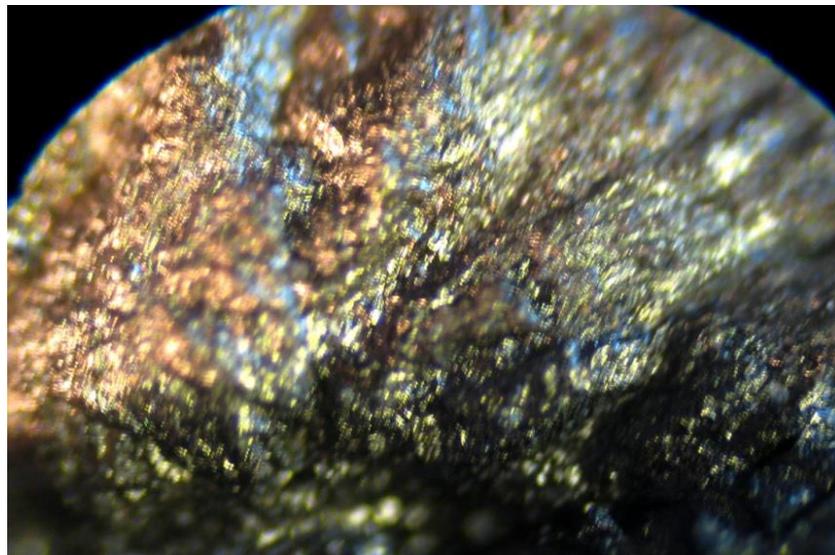


Рисунок 3.23 – Структура ПК на базе краски Defender M Solvent без дополнительного разбавления

Толщина слоя краски во всех трёх случаях составляет 850 мкм; время обжига после достижения +500 °С – 30 мин. На поверхности относительно мало пор, что объясняется сравнительно невысокими значениями коэффициентов вспучивания и

определяет высокую прочность ПК. Прочность полученных ПК снижается при повышении объемной доли разбавителя из-за появления всё более развитой системы микротрещин и более крупных пор (рисунки 3.24 и 3.25). Трещины, вероятно, обусловлены выходом паров разбавителя.



Рисунок 3.24 – Структура ПК на базе краски Defender M Solvent с добавкой 4 об. % орто-ксилола



Рисунок 3.25 – Структура ПК на базе краски Defender M Solvent с добавкой 8 об. % орто-ксилола

Коэффициент вспучивания полученных образцов ПК составляет $25 \div 35$ (рисунок 3.23), $25 \div 28$ (рисунок 3.24), $16 \div 20$ (рисунок 3.25).

На рисунках 3.26 и 3.27 показаны поверхности срезов реакционной зоны формирования ПК. Толщина слоя краски – 850 мкм; время обжига после достижения $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0 мин. Материал вязкий, ещё не обуглероженный. Поверхность среза невозможно выровнять из-за высокой адгезии (липкости) материала к поверхности срезающего инструмента (лезвия или тонкой проволоки).

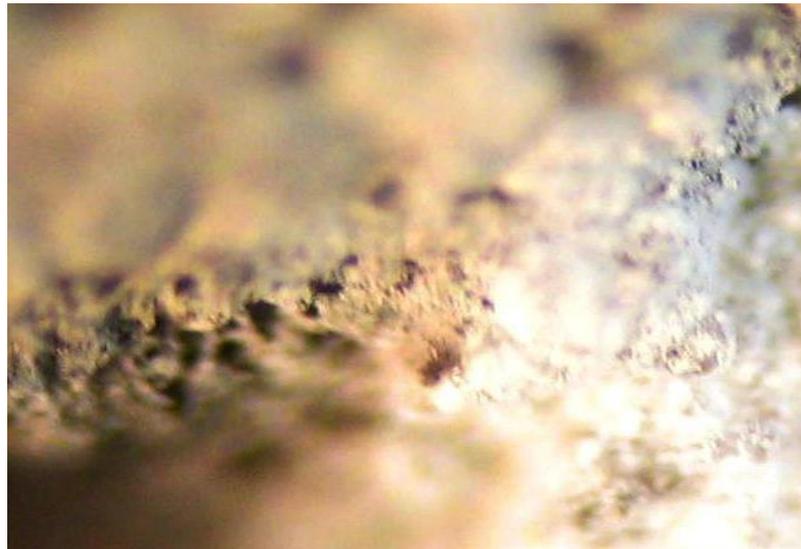


Рисунок 3.26 – Структура ПК на базе краски Defender M Solvent с добавкой 2 об. % орто-ксилола (мелкие поры)

Хорошо видны два типа микропор – малые, вызванные порообразующим (вспучивающим) комплексом и большие (на рисунке 3.26 на заднем плане, на рисунке 3.27 – на переднем), вызванные выходом паров растворителя. Предположительно, через несколько лет эксплуатации остаточная концентрация растворителя и разбавителя будет стремиться к 0, и при вспучивании структура реакционной зоны будет более равномерной с преобладанием мелких равномерно расположенных пор.



Рисунок 3.27 – Структура ПК на базе краски Defender M Solvent с добавкой 5 об. % орто-ксилола (крупные поры)

На рисунке 3.28 показан ПК низкого качества, полученный из вспучивающейся структуры ПК на базе краски Defender M Solvent с добавкой 10 об. % орто-ксилола.

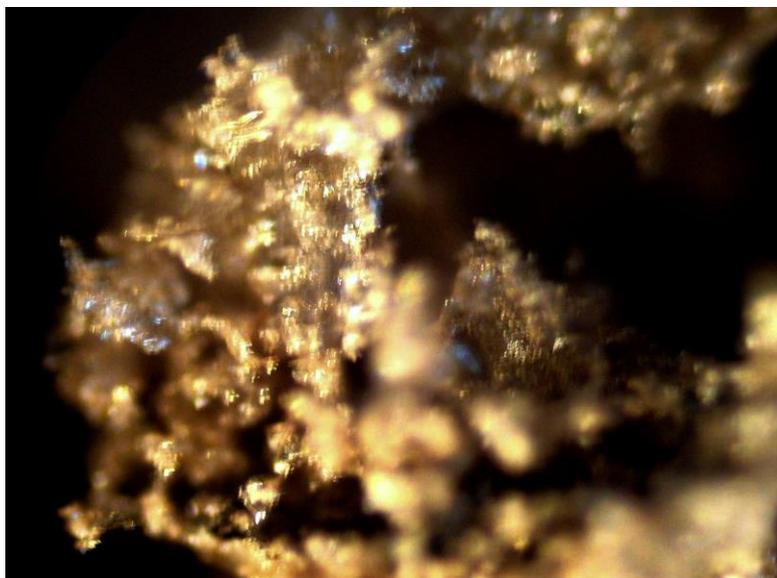


Рисунок 3.28 – Структура ПК на базе краски Defender M Solvent с добавкой 10 об. % орто-ксилола (неупорядоченная структура)

Видна неупорядоченная структура, недостаточная степень конверсии материалов в углерод, что определяется по цвету образца.

3.7 Выводы по главе 3

Основными причинами брака интумесцентной огнезащиты являются нарушения технологии при производстве краски на заводе-изготовителе и проведении огнезащитных работ на объекте защиты.

Характерными видами брака ОЗП являются: сползание интумесцентной краски с защищаемой конструкции в процессе формирования ПК; неравномерная структура ПК с крупными газовыми полостями; отсутствие процесса вспучивания ИП; низкая прочность структуры ПК со слабой адгезией к подложке.

Толщина сухого слоя ИП и степень разбавления готовой краски непосредственно перед ее нанесением оказывают весомое влияние на качество пенококса (конечного целевого продукта интумесцентной краски) – толщину слоя ПК и плотность, которые невозможно выявить при внешнем осмотре сухого слоя краски, контроле его толщины и величины условной адгезии, используя современные стандарты. Тепловое и механическое воздействие потоков раскаленных газов и дыма могут полностью разрушить ПК, если при формировании и полимеризации нанесённого ИП присутствуют скрытые дефекты, обусловленные излишним разбавлением краски.

Обосновано, что СП 433.1325800.2019 не содержит требований, обеспечивающих всестороннюю оценку качества ИП в лабораторных условиях. Требуется разработка методики для выявления скрытых дефектов в процессе проверки свойств тонкослойного ОЗП непосредственно на объекте защиты и на существенно больших участках ОЗП (20–80 см²), подвергаемых локальному огневому воздействию, с последующим восстановлением покрытия на этих участках.

Приведенные результаты исследований доказывают, что критерий вспучиваемости не является единственным (и конечным) параметром, определяющим свойства ОЗП, и его проверка по действующим на данный момент методикам не даёт полной картины о качестве ОЗС. Внесение в техническую

документацию на ИП данных о коэффициентах вспучивания в зависимости от толщины сухого слоя ОЗП предлагается сделать обязательным требованием.

При изучении физико-механических свойств ПК выявлена зависимость его прочностных характеристик от плотности, которая, в свою очередь, зависит от коэффициента вспучивания (при прочих равных условиях). Высокие значения коэффициента вспучивания не гарантируют надёжность огнезащиты. Показатели плотности и прочности ПК снижаются при увеличении коэффициента вспучивания. Так как прочность ПК зависит от его плотности, а последняя в свою очередь имеет зависимость от коэффициента вспучивания, есть необходимость в определении численных границ коэффициента вспучивания для выработки рекомендаций по параметрам наиболее надёжной огнезащиты.

В результате применения метода математической обработки эксперимента получены адекватные уравнения регрессии, отражающие зависимость коэффициента вспучивания ПК и его прочности на сжатие от объемной доли разбавителя, толщины слоя нанесенной на защищаемую поверхность краски и времени обжига ПК после достижения 500 °С согласно температурной кривой обжига.

Подтверждена эффективность метода пенетрометрии при определении прочности ПК на сжатие и на сдвиг. Метод является простым, демонстративным и не требует дорогостоящего оборудования.

В результате исследований, представленных в данной главе, сформирована система показателей качества как основа разрабатываемой методики контроля параметров интумесцентных ОЗП на объекте защиты: коэффициент вспучивания, локальный предел прочности ПК на сжатие / сила внедрения индентора в ПК, предел прочности ПК на сдвиг / сила сдвига ПК, однородность структуры ПК на срезе.

ГЛАВА 4 ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТУМЕСЦЕНТНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ НА ОБЪЕКТЕ ЗАЩИТЫ

4.1 Технические условия контроля параметров интумесцентной огнезащиты и комплект средств измерений

Основной целью исследования методов оценки тонкослойных ОЗП является разработка комплексной методики для выявления скрытых дефектов на стадии контроля покрытия непосредственно на объекте защиты. Это позволит оперативно определять скрытый брак огнезащиты, который в настоящее время невозможно выявить без доставки образцов ИП в лабораторию, и позволит исключить применение некачественного огнезащитного материала или нарушение технологии нанесения составов при выполнении огнезащитных работ. Следует отметить, что оборудование, рекомендованное ГОСТ 30247.0-94 [65], является дорогим, громоздким, требует системы подачи жидкого топлива, мощной вытяжной системы, отдельного помещения с системой пожаротушения и применимо только для хорошо оснащённых лабораторий системы сертификации или для крупных производителей [123].

Для лицензиатов и аккредитованных испытательных лабораторий нужно иметь лёгкое, переносное, компактное и несложное в эксплуатации оборудование для оценки важнейших параметров огнезащитной краски на объекте защиты.

В данном разделе представлены технические требования, разработанные для конструирования приборного комплекса, предназначенного для проверки качества как свежих, так и старых ИП, с целью оценки их пригодности к дальнейшей эксплуатации.

Учитывая местоположение защитных покрытий, расположенных на стальных конструкциях, в том числе, на значительной высоте над уровнем пола, приборный комплекс планируется выполнить полностью автономным.

Для предлагаемой комплексной экспресс-оценки качества ИП на защищаемой конструкции требуется провести соответствующие технологические операции. ОК комплектуется универсальным креплением или комплектом сменных узлов крепления для обеспечения фиксации на металлических конструкциях разной конфигурации, в горизонтальном и вертикальном положении.

Требования к узлам крепления ОК и газового нагревателя:

- надёжное закрепление на весь период работы, предохранение от случайного падения;

- удобное и быстрое закрепление / снятие.

Требования к ОК:

- возможность применения для многократного нагрева открытым пламенем внутреннего (рабочего) пространства до температуры не более 600 °С;

- ограничение пятна нагрева габаритным размером ОК;

- небольшой вес (не более 350–500 г вместе с креплениями);

- ограниченный габаритный размер (диаметр не более 100 мм).

Оборудование для оценки физико-механических свойств пенококса представлено в таблице 4.1 [134].

Таблица 4.1 – Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной огнезащиты

Оборудование	Ориентировочные параметры	Примечание
ОК с универсальными креплениями	Размеры области огневого воздействия: не более Ø 100 мм	Собственная разработка (рисунок 2.1)
Источник пламени – газовый баллон объемом 0,3–0,5 л с горелкой	Обеспечение температуры не более +600 °С в течение 45 мин с перерывами	ТУ и спецификации изготовителей
Измеритель температуры нагреваемой поверхности	ТЭП или контактный термометр с пределом измерения до 1000 °С	ТУ и спецификации изготовителей

Продолжение таблицы 4.1

Оборудование	Ориентировочные параметры	Примечание
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 штампа	Измерение силы внедрения индентора с пределом измерений до 500–750 г; диапазон перемещения штока не менее 50 мм	Собственная разработка (рисунок 2.8)
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 2.9)
Электромагнитный толщиномер лакокрасочных покрытий до 3000 мкм	Измерение толщины ОЗП до начала экспресс-анализа	ТУ и спецификация изготовителя

Технические требования к приборам для измерения сил внедрения индентора и сдвига:

- надёжное закрепление на всё время работы, предохранение от случайного сдвига во время приложения силы на инденторе;
- удобное и быстрое закрепление / снятие;
- удобное включение в работу (приложение силы на индентор);
- наглядное и удобное считывание показаний динамометров, в том числе электронное дистанционное с фиксацией показаний.

Общие требования к комплекту приборов:

- независимость от внешних источников энергии;
- удобство закрепления и снятия любого узла комплекта;

- надёжность и удобство снятия показаний приборов;
- пожаробезопасность;
- небольшой вес и компактность при транспортировке.

Представленный в таблице 4.1 комплект средств измерений дает возможность непосредственно на объекте измерить толщину слоя ПК, силу внедрения индентора в ПК и силу сдвига ПК и получить достаточно ясное представление о качестве ОЗП строительной конструкции.

4.2 Условия применения методики

Применение разработанной методики контроля параметров интумесцентных ОЗП на объекте защиты [135, 136] и комплекта средств измерений параметров ОЗП [134] может происходить в следующих случаях:

- а) на стадии инструментального контроля выполненной огнезащиты на объекте строительства, реконструкции и/или капитального ремонта;
- б) на объектах, ранее введенных в эксплуатацию, при исполнении надзорной деятельности;
- в) при проведении внеплановой проверки;
- г) при расследовании ЧС.
- д) при мониторинге технического состояния огнезащитных покрытий (общий мониторинг) СП 432.1325800.2019.

Предлагаемая методика должна использоваться не ранее, чем после полного достижения эксплуатационных характеристик огнезащитным материалом, то есть после полного набора прочности огнезащитным материалом, например, через 20–30 суток в зависимости от условий сушки покрытия, состава материала и рекомендаций изготовителя.

Количество и места для испытаний определяет специалист аккредитованной пожарной лаборатории в соответствии с прилагаемой методикой.

Места проверок и тип ОК (установки ОК с огневым воздействием) должны выбираться с учётом специфики объекта, его назначения и конфигурации помещений. Подготовка мест испытаний производится аналогично подготовке мест проведения других огневых работ (например, резка и сварка трубопроводов).

При проверке ОЗП эксплуатируемых объектов необходимо соблюдать следующие условия [135]:

1. В служебных, торговых, складских и производственных помещениях испытания проводить в нерабочее время при отсутствии скопления людей;
2. Вблизи места испытания не должно быть легковозгораемых предметов, материалов и жидкостей;
3. Следует подготовить расположенную рядом площадь – убрать все предметы, мешающие работе, и горючие материалы;
4. Обеспечить вентиляцию;
5. Подготовить первичные средства пожаротушения;
6. Назначить лицо, ответственное за безопасное проведение испытаний;
7. Оформить наряд-допуск на огневые работы.

Метод точечного нагрева ИП в местах отбора проб описан в п. 2.4.1 настоящего диссертационного исследования.

4.3 Сравнительные испытания огнезащитной эффективности

Методика данных испытаний разработана с целью проверки результатов, полученных посредством разработанных методов контроля параметров ИП, в сравнении с результатами оценки огнезащитной эффективности стандартным методом, описанным в ГОСТ Р 53295-2009 (п. 3.4, 6) [111].

Приложение А [111] регламентирует испытания на огнезащитную эффективность, при котором обеспечивается тепловое воздействие на опытный образец и определяется время с момента начала теплового воздействия до наступления предельного состояния опытного образца.

Приложение Б [111] – регламентирует процесс определения предела огнестойкости конструкции при огневом воздействии до достижения предельно допустимой деформации для балок, определяемой по ГОСТ 30247.1-94 [65].

До начала испытаний необходимо выполнить контрольные измерения фактической толщины нанесенного на образцы ОЗС [111]. Замеры толщины осуществляются не менее чем в десяти точках по периметру обогреваемой поверхности двутавра с шагом не более 500 мм. Результатом измерений считается среднее арифметическое значение результатов всех измерений. Допускается среднее квадратическое отклонение не более 20 % от результата измерений. Оценка и пример вычисления среднего квадратического отклонения результата измерений даны в приложении Д [111].

При испытании для определения огнезащитной эффективности статическая нагрузка на конструкции исключена, тепловое воздействие реализуется с четырех сторон до наступления предельного состояния опытного образца. За предельное состояние принимают достижение металлом опытного образца критической температуры равной +500 °С (среднее значение по показаниям трех термопар).

При определении предела огнестойкости испытания образца проводятся при трехстороннем тепловом воздействии с приложенной статической нагрузкой по двухточечной схеме в каждой трети длины пролета. Длина пролета должна составлять (3000 +/- 10) мм. Величина нагрузки принимается равной (7,00 +/- 0,35) т. Испытания проводят до наступления предельного состояния опытного образца. За предельное состояние образца принимается достижение предельно допустимой деформации для балок, определяемой по ГОСТ 30247.1-94.

Порядок проведения испытаний

Порядок действий при проведении сравнительных испытаний огнезащитной эффективности приведен ниже.

1. Подготовка образцов красок для нанесения покрытий на конструкции.
2. Нанесение красок на образцы – двутавры горячекатаные с параллельными полками (ГОСТ Р 57837-2017) для проведения испытаний.

3. Сушка покрытий до полного удаления разбавителя – 10–14 дней при температуре +20 °С и влажности не более 80 %.

4. Проведение испытания для каждого образца по разработанной методике экспресс-анализа.

5. Восстановление покрытий в местах испытаний.

6. Сушка восстановленных участков.

7. Проведение испытаний для каждого образца в факельной печи по ГОСТ Р 53295-2009 [111].

7.1. Испытания колонны (вертикально ориентированная в печи конструкция) на огнезащитную эффективность по параметру «время достижения критической температуры».

7.2. Испытания на огнестойкость конструкций (горизонтально ориентированная в печи балка с нагрузкой) по параметру «критический прогиб при нагревании».

8. Анализ результатов испытаний, полученных по методике экспресс-анализа, в сравнении с результатами испытаний по ГОСТ [111], установление вероятной пригодности балки к дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, после проведенных испытаний сравниваем стандартизированные параметры, в том числе отраженные в технической документации на ОЗС. Сравнение результатов испытаний на образцах даёт информацию о параметре «кратность пенококса» (соответствует или не соответствует заявленным в технической документации параметрам, совпадают или не совпадают результаты испытаний по экспресс-методике и по ГОСТ). Кроме того, анализируем нестандартизованные параметры – прочность, однородность пенококса и т.д., определяем стандартные параметры времени достижения на образце критической температуры, критического прогиба при нагревании.

Материалы и условия проведения испытаний

При проведении испытаний огнезащитных свойств элементов металлической строительной конструкции применяли 3 различных варианта интумесцентной (вспучивающейся) краски [137]:

– краска Defender M Solvent (см. 2.1.1) с параметрами, соответствующими технической документации на состав (ОЗС 1);

– та же краска с превышением максимально допустимого технической документацией на материал разбавлением – 6 об. % орто-ксилола (ОЗС 2);

– та же краска с избыточным разбавлением – 10 об. % орто-ксилола (ОЗС 3).

Излишнее разбавление выбрано в связи с тем, что на практике такой вариант встречается нередко (корректировка вязкости краски при использовании неподходящего, дешёвого оборудования для нанесения покрытия или с целью мнимой экономии краски). Согласно инструкции допускается разбавление не более 5 %.

Защищаемые конструкции:

– двутавры горячекатаные № 20Б1 (ГОСТ Р 57837-2017) с толщиной слоя готового ОЗП после сушки 0,82–0,83 мм для испытания колонны (вертикально ориентированная в печи конструкция) на огнезащитную эффективность по параметру «время достижения критической температуры»;

– балки сортамента 30 Ш1 длиной 4,2 м с тонкослойным ОЗП толщиной 0,87 мм для испытания на огнестойкость конструкций (горизонтально ориентированная в печи балка с нагрузкой) – по параметру «критический прогиб при нагревании».

Результаты испытаний по методике экспресс-анализа оценивали по показателям:

– общий вид ПК;

– коэффициент вспучивания;

– прочность ПК на сжатие;

– прочность ПК на сдвиг приграничного слоя ПК толщиной 1 мм от подложки.

Дополнительно в условиях лаборатории измеряли плотность ПК (см. п. 2.4.1 настоящего диссертационного исследования).

Параметр оценки огнестойкости по ГОСТ 30247.0-94 [65] – время достижения критической температуры защищаемого материала. Для оценки

параметра получали температурную кривую – зависимость критической температуры стальной подложки от времени проведения огневого испытания.

Испытания проводили при следующих внешних условиях:

- температура окружающей среды – +18 °С;
- относительная влажность воздуха – 30 %;
- скорость движения воздуха – менее 0,5 м/с.

Средние температуры в огневой камере печи не превышали допустимых отклонений по ГОСТ [65].

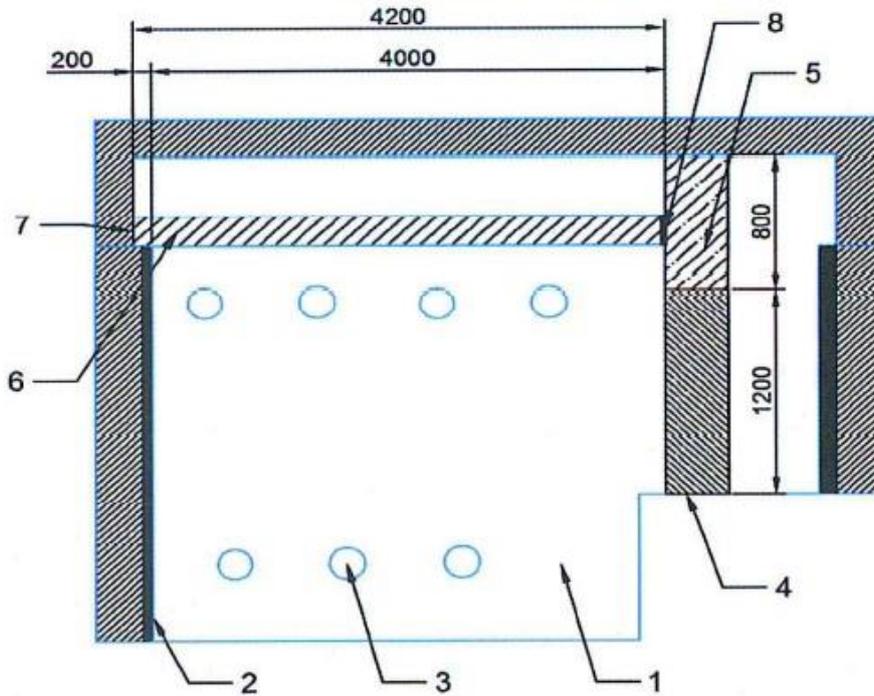
Процесс испытания на определение огнестойкости в стандартной печи и формирование пенококса на металлической колонне двутаврового сечения, покрытой ОЗС 1, показаны на фото (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Огневое испытание огнезащитной эффективности интумесцентной краски Defender M Solvent в стандартной печи и процесс/результат формирования пенококса на двутавровой колонне

Согласно методике испытаний для определения критического прогиба при нагревании конструкции в процессе огневого воздействия образец балки устанавливали в горизонтальную печь для испытаний строительных конструкций (рисунок 4.2). Горячие спаи печных термоэлектрических преобразователей в количестве 7 шт. устанавливали равномерно по площади огневого проёма на

расстоянии 200 мм от стен, пола и потолка печи и на расстоянии 100 ± 10 мм от обогреваемой поверхности образца.



1 – огневое пространство печи, 2 – футеровка печи, 3 – горелки печи, 4 – подставка, 5 – колонна (длина с учетом подставки 2000 мм), 6 – балка с узлом сопряжения с колонной (длина с узлом сопряжения 4000 мм), 7 – футеровка зоны опирания, 8 – узел сопряжения

Рисунок 4.2 – Схема печи

Образец испытывали под точечной нагрузкой через каждые $1/3$ пролёта. Величина нагрузки в каждой точке составляла 3,5 т. Схема нагружения показана на рисунке 4.3.

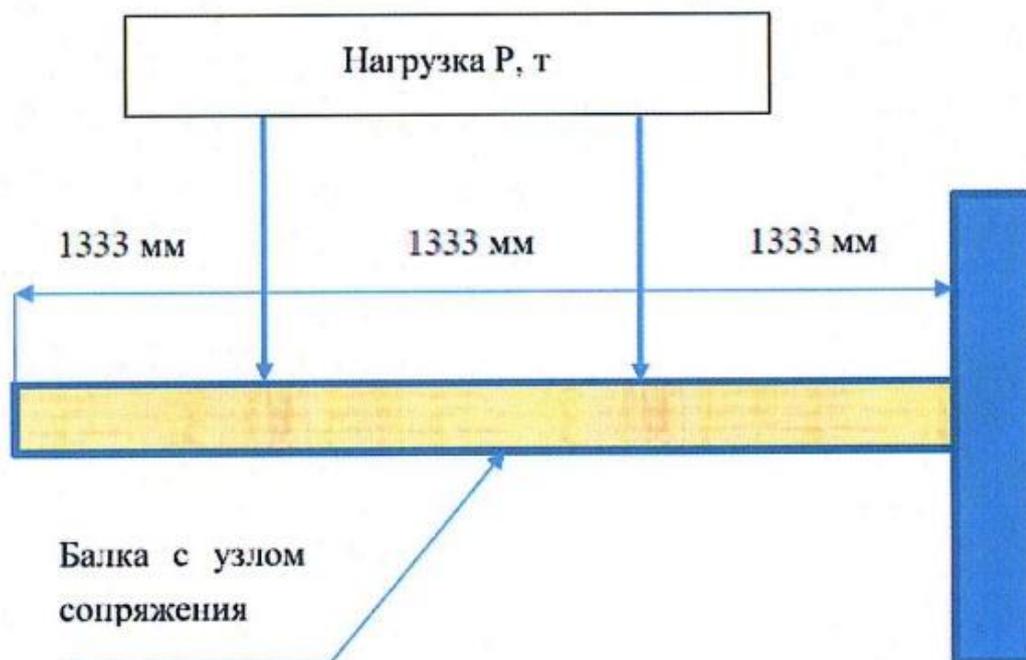


Рисунок 4.3 – Схема нагружения балки в печи

В процессе испытаний регистрировали:

- время наступления предельных состояний и их вид;
- температуру в печи;
- температуру на необогреваемой поверхности образца;
- деформацию балки;
- температурный режим в камере.

Средства измерений для проведения испытаний с целью определения времени наступления предельных состояний и потери несущей способности при нагревании представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Перечень средств измерений

Наименование средств измерений	Заводской №	Предел измерений	Класс точности
Секундомер СОС _{пр}	9825	0–60 мин	2
Комбинированный измеритель Testo-410-1	38479366/001	0,4–20 м/с	2
Барометр БАММ-1	1404	80–106 кПа	±0,2 кПа
Измеритель влажности и температуры ИВТМ-7М	26033	0–99 % -20...+50 °С	±2,0 % ±0,2 °С
Рулетка измерительная РЗУ-3Д	330	0–3 м	2
Дифманометр цифровой ДМЦ-01М	05860	0–2000 Па	±0,5 Па
Датчик линейных перемещений серии RX 80-2000-420А-8А12	20581140	0–2000 мм	±0,05 %
Датчик линейных перемещений серии RX 80-2000-420А-8А12	18567589	0–2000 мм	±0,05 %
Преобразователь термоэлектрический КТХА 02.02-260-К1-11-Т310-4,5-2200-2000	1246-1-1... ...1246-1-7	-40...1100 °С	Класс допуска 1

Результаты проверки эффективности огнезащиты

После проведения огневых испытаний и охлаждения образцов выполнен их осмотр и физико-механические измерения параметров. Обобщенные результаты испытаний с применением стандартной методики (ГОСТ Р 53295-2009, часть А) и разработанной методики экспресс-анализа представлены в таблице 4.3 [137]. В таблицу включены результаты измерений плотности ПК (в разработанной методике экспресс-анализа не предусмотрены).

Таблица 4.3 – Результаты испытаний интумесцентного ОЗП по методикам экспресс-анализа и ГОСТ 30247.0-94 [65]

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

Далее изложены особенности поведения опытных образцов при проведении испытаний на огнезащитную эффективность по разработанной методике экспресс-анализа и стандартной методике (ГОСТ Р 53295-2009 [111]).

Характерные особенности огневого испытания образцов, покрытых ОЗС 1 – по методике экспресс-анализа:

1. После начала нагрева при температуре на поверхности покрытия +200...250 °С в течение 1,5 мин происходит начало вспучивания покрытия.
2. Далее при увеличении температуры до +500...550 °С в течение 5–7 мин покрытие активно вспучивается.
3. Время завершения процесса вспучивания и стабилизации ПК – 7–8 мин. при температуре +520–550 °С на поверхности слоя ПК.
4. По истечении еще 20 мин появление золы не наблюдается. Нагрев остановлен.

– по стандартной методике:

1. Через 8–10 мин от начала испытания – начало вспучивания покрытия.
2. Через 20 мин вспучивание продолжается. Покрытие имеет однородный чёрный цвет.
3. Через 45 мин критическая температура стальной подложки еще не достигнута.

Время нагрева до критической температуры составило 47 мин. При этом средние температуры в огневой камере не превышали допустимых отклонений по ГОСТ 30247.0-94. Кривая изменения температуры образца приведена на рисунке 4.4.

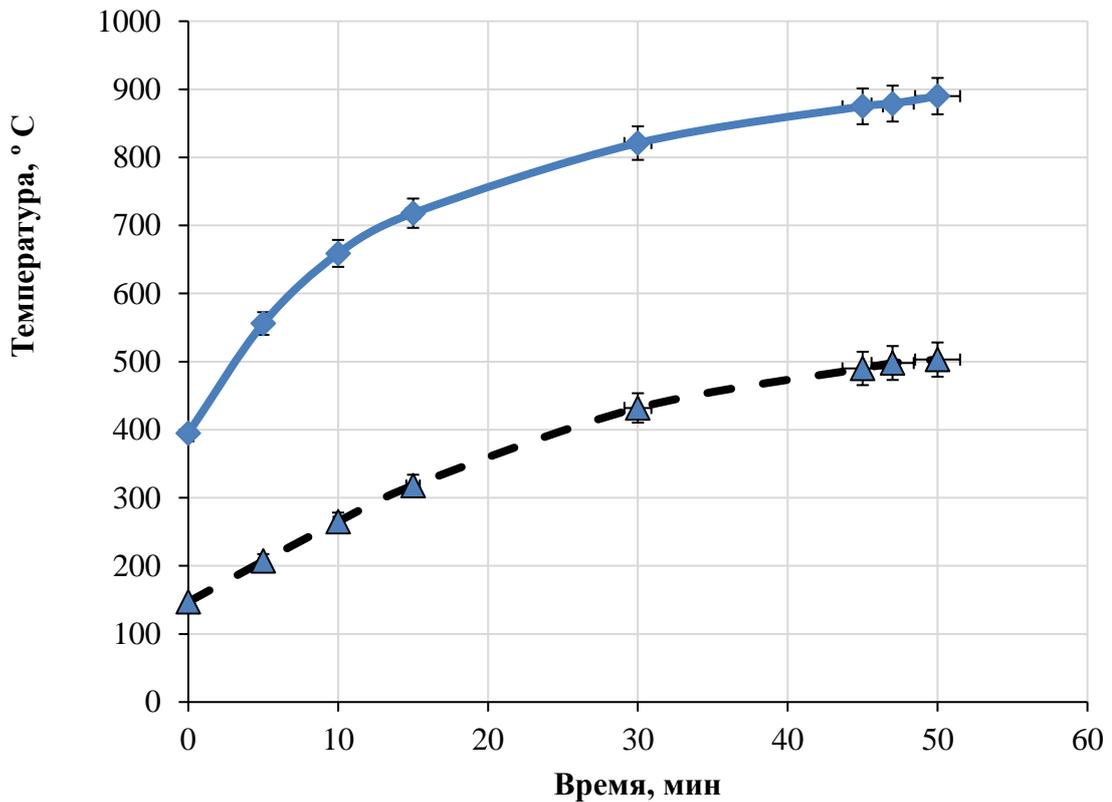


Рисунок 4.4 – Время достижения критической температуры образца, покрытого ОЗС 1 (без разбавления). Сплошная линия – температура нагрева, штриховая линия – температура поверхности под слоем ПК

Для установления предела огнестойкости испытуемого образца, покрытого ОЗС 1, испытания проводили при следующих параметрах окружающей среды:

- температура +22 °С;
- атмосферное давление 99,7 кПа;
- относительная влажность воздуха 42 %;
- скорость движения воздуха 0,1 м/с.

Измерения указанных параметров проводили на расстоянии 2 м от испытуемого образца. Результаты измерений толщины ОЗП представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Значения толщин покрытия с ОЗС 1, нанесенного на балку

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение в мкм	801	789	804	902	870	835	902	881	894	901
№ измерения	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значение в мкм	852	846	798	812	830	841	839	842	824	846
№ измерения	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Значение в мкм	848	852	834	881	872	865	855	860	854	857

Среднее арифметическое значение толщины покрытия с ОЗС 1 составило 0,845 мм. Среднеквадратичное отклонение от среднего арифметического значения составило 6,83 %. Результаты испытания образца, покрытого ОЗС 1, приведены в таблице 4.5. Кривая деформации образца показана на рисунке 4.5. Критическое значение прогиба 200 мм было достигнуто через 45 мин.

Таблица 4.5 – Протокол испытаний образца, покрытого ОЗС

Пп. по ГОСТ 30247.0-94	Наименование параметра	Значение по ГОСТ	Фактическое значение
П. 6.1, 6.2	Температурный режим	$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1)$	В пределах нормы
П. 4.2	Избыточное давление в огневой камере печи	10±2 Па	9...11 Па
П. 8.1.1	Потеря несущей способности (R)	Потеря несущей способности (R) или превышение допустимых пределов деформации или скорости её нарастания	Через 47 мин от начала теплового воздействия зафиксировано превышение допустимой деформации и скорости её нарастания.
П. 8.2	Время появления пламени на необогреваемой поверхности образца; время появления и характер трещин, отверстий, отслоений и др. изменения		Через 15 мин от начала теплового воздействия наблюдался выход дыма; через 45 мин от начала воздействия наблюдался заметный прогиб балки

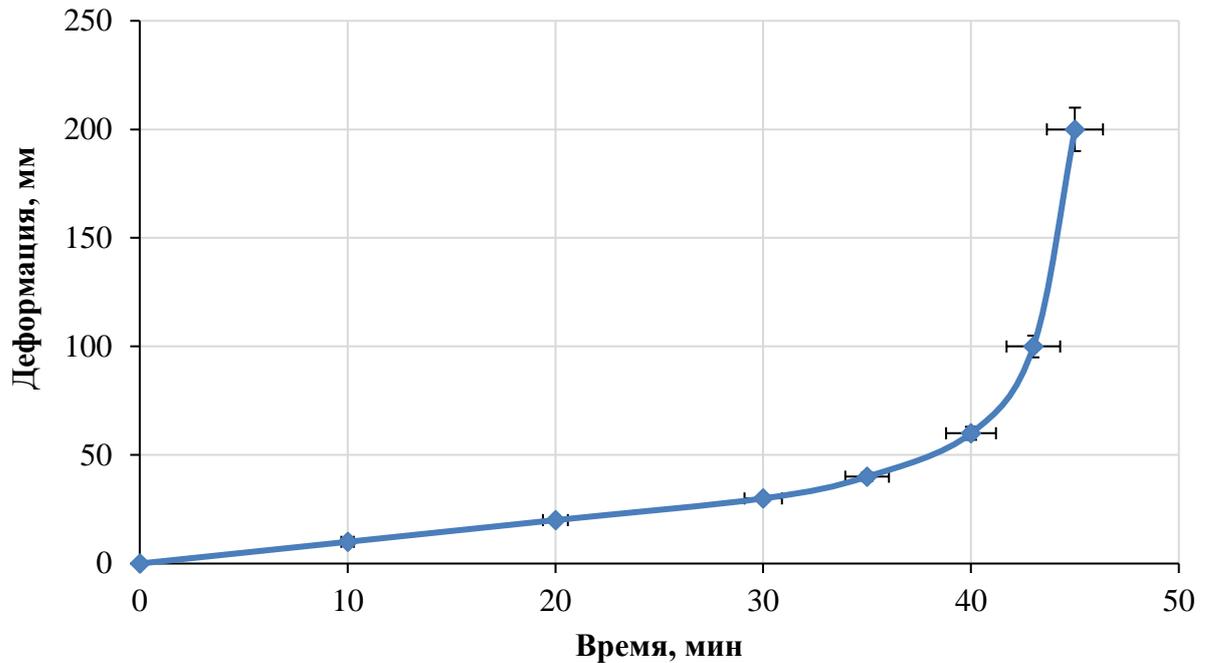


Рисунок 4.5 – Зависимость прогиба образца с покрытием ОЗС 1 от времени теплового воздействия в огневой камере печи

Характерные особенности огневого испытания образцов, покрытых ОЗС 2 – по методике экспресс-анализа:

1. После начала нагрева при температуре на поверхности покрытия $+200\dots250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2–3 мин – потемнение и начало вспучивания покрытия.
2. Далее в течение 8 мин покрытие вспучивается слабо.
3. Время завершения процесса вспучивания и стабилизации ПК составляет 8–9 мин при температуре $+520\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхности ПК;
4. Через 10 мин нагрев закончен.
5. После охлаждения проведён осмотр и механические измерения.

– по стандартной методике:

1. Через 8–10 мин от начала испытания покрытие начинает вспучиваться.
2. Через 15–20 мин вспучивание продолжается. Слой ПК чёрного цвета с элементами озоления, поверхность имеет вздутия, появляются трещины.
3. Через 34 мин достигнута критическая температура стальной подложки.

Средние температуры в огневой камере не превышали допустимых отклонений по ГОСТ 30247.0-94. Температурная кривая прогрева опытного образца стальной пластины представлена на рисунке 4.6.

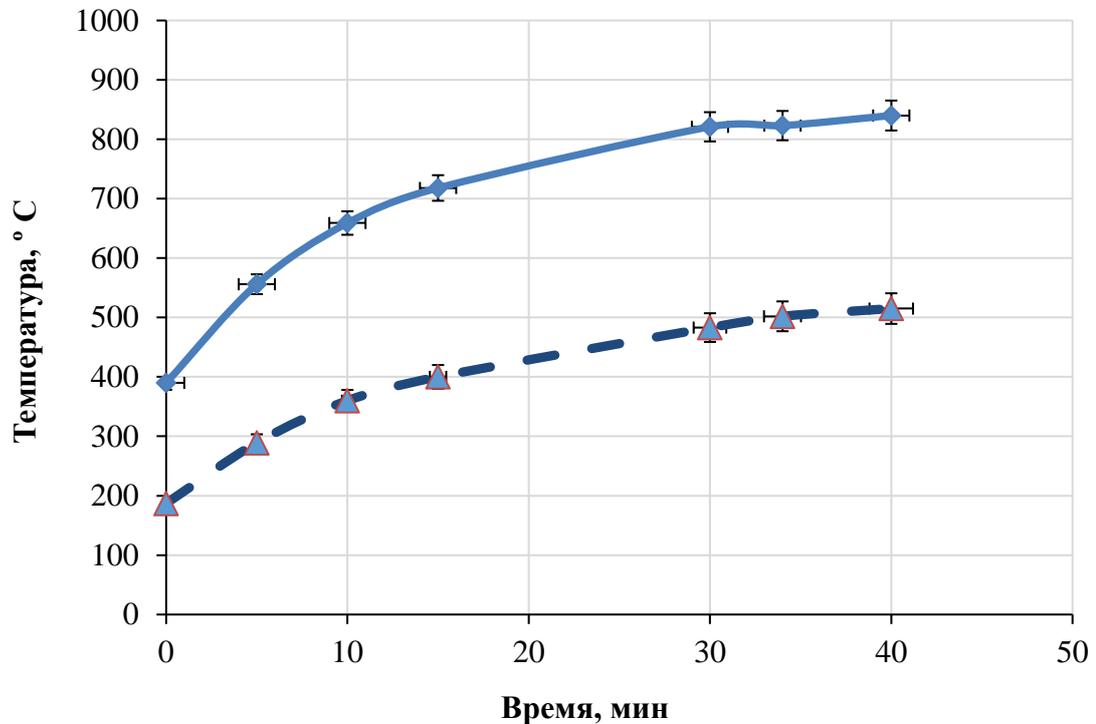


Рисунок 4.6 – Время достижения критической температуры образца, покрытого ОЗС 2 (с добавлением 6% разбавителя). Сплошная линия – температура нагрева, штриховая линия – температура поверхности под слоем ПК

Предел огнестойкости испытуемого образца, покрытого ОЗС 2, определяли при следующих параметрах окружающей среды:

- температура +20 °C;
- атмосферное давление 99,9 кПа;
- относительная влажность воздуха 39 %;
- скорость движения воздуха 0,12 м/с.

Измерения параметров проводили на расстоянии 2 м от испытуемого образца. Результаты измерений толщины ОЗП представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Значения толщин покрытия с ОЗС 2, нанесенного на балку

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение в мкм	801	789	804	920	870	865	902	881	894	901
№ измерения	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значение в мкм	852	846	798	812	830	841	839	842	844	846
№ измерения	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Значение в мкм	848	852	864	881	872	865	855	860	854	857

Кривая деформации образца, покрытого ОЗС 2, представлена на рисунке 4.7.

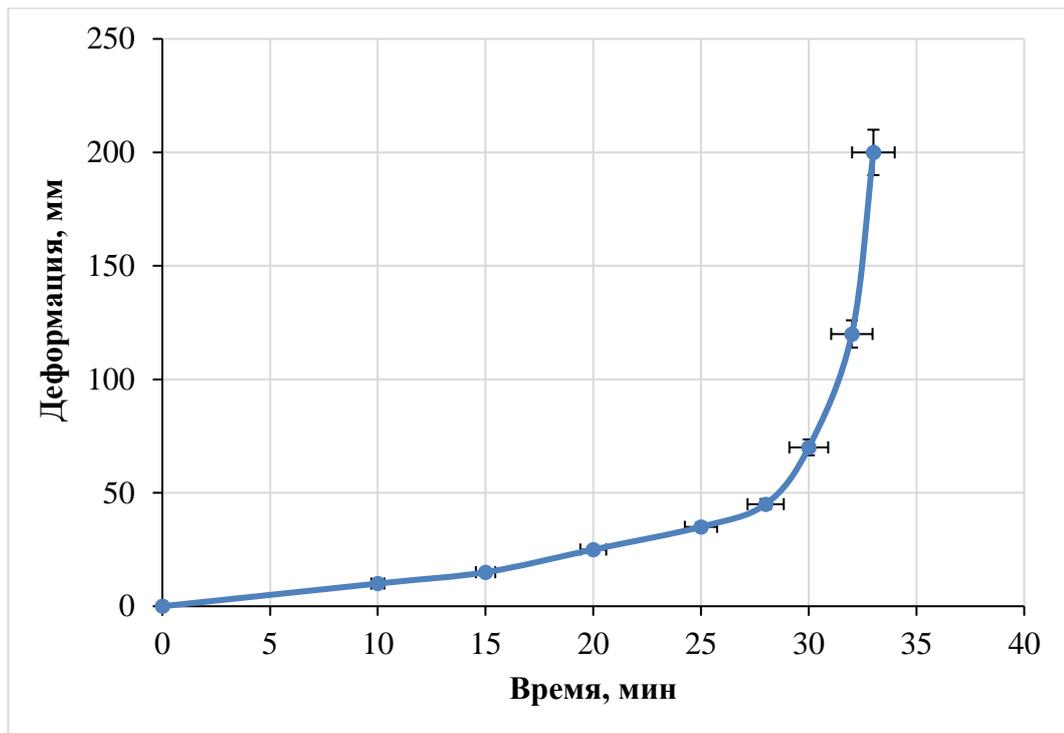


Рисунок 4.7 – Зависимость прогиба образца с покрытием ОЗС 2 (6 % разбавителя) от времени теплового воздействия в огневой камере печи

Критическое значение прогиба 200 мм у образца с покрытием ОЗС 2 было достигнуто через 33 мин, что говорит о несоответствии испытуемого материала технической документации и о невозможности использовать состав для обеспечения огнезащитной эффективности 45 мин и предела огнестойкости R45.

Результаты испытаний по методу экспресс-анализа подтверждают непригодность краски, несмотря на то, что коэффициент вспучивания покрытия ОЗС 2 превышает минимальное значение, указанное в нормативной документации. Полученный ПК внешне неоднороден, заметны крупные газовые полости. Слои ПК вне этих дефектов имеют повышенную прочность и, соответственно, плотность слоя и относительно низкую величину адгезии к защищаемому материалу [137].

Характерные особенности огневого испытания образцов, покрытых ОЗС 3 – по методике экспресс-анализа:

1. После начала нагрева при температуре на поверхности покрытия $+200\dots250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3–4 мин – потемнение и начало неравномерного вспучивания покрытия.

2. Далее в течение 5–8 мин покрытие слабо вспучивается.

3. Время завершения процесса вспучивания и стабилизации пенококса составляет менее 8 мин при температуре на поверхности пенококса равной $+550\text{--}570\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Через 10 мин нагрев закончен.

– по стандартной методике:

1. Через 8–10 мин от начала испытания покрытие начинает вспучиваться.

2. Через 15–20 мин вспучивание покрытия прекращается. ПК имеет чёрный цвет с озолением, поверхность имеет вздутия, значительные трещины.

3. Через 27 мин от начала испытания достигнута критическая температура стальной подложки.

Средние температуры в огневой камере не превышали допустимых отклонений по ГОСТ 30247.0-94.

Температурная кривая прогрева опытного образца стальной пластины представлена на рисунке 4.8.

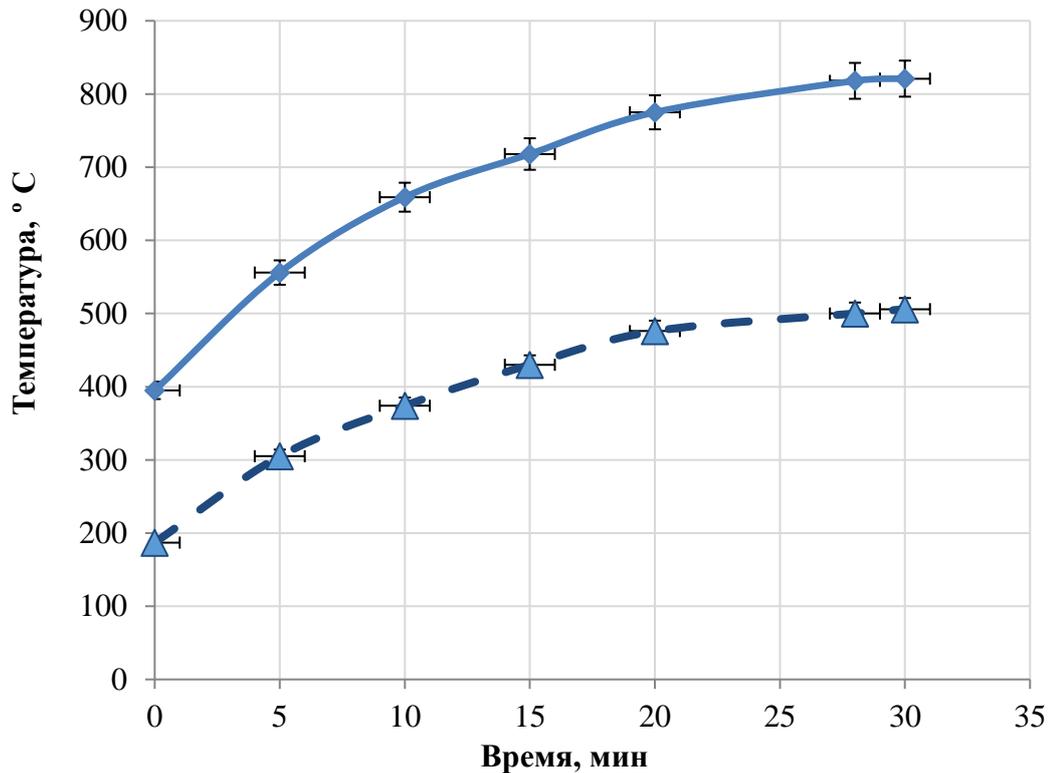


Рисунок 4.8 – Время достижения критической температуры образца, покрытого ОЗС 3 (с добавлением 10% разбавителя). Сплошная линия – температура нагрева, штриховая линия – температура поверхности под слоем ПК

Предел огнестойкости испытуемого образца, покрытого ОЗС 3, определяли при следующих параметрах окружающей среды:

- температура +22 °C;
- атмосферное давление 99,7 кПа;
- относительная влажность воздуха 40 %;
- скорость движения воздуха 0,09 м/с.

Измерения вышеуказанных параметров проводили на расстоянии 2 м от испытуемого образца. Результаты измерений толщины ОЗП представлены в таблице 4.7.

Среднее арифметическое значение толщины покрытия составило 0,858 мм. Среднеквадратичное отклонение от среднего арифметического значения – 6,23 %.

Таблица 4.7 – Значения толщин покрытия с ОЗС 3, нанесенного на балку

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значение в мкм	840	846	854	901	886	844	796	842	836	840
№ измерения	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Значение в мкм	798	796	884	1014	1023	986	892	894	876	878
№ измерения	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Значение в мкм	967	860	880	780	880	937	793	830	782	1057

Кривая деформации образца, покрытого ОЗС 3, показана на рисунке 4.9. Образец с покрытием ОЗС 3 достигает критической температуры стальной подложки через 25 мин при испытаниях по стандартной методике, что свидетельствует о непригодности краски с ОЗС 3 по заявленному показателю времени достижения критической температуры (45 мин).

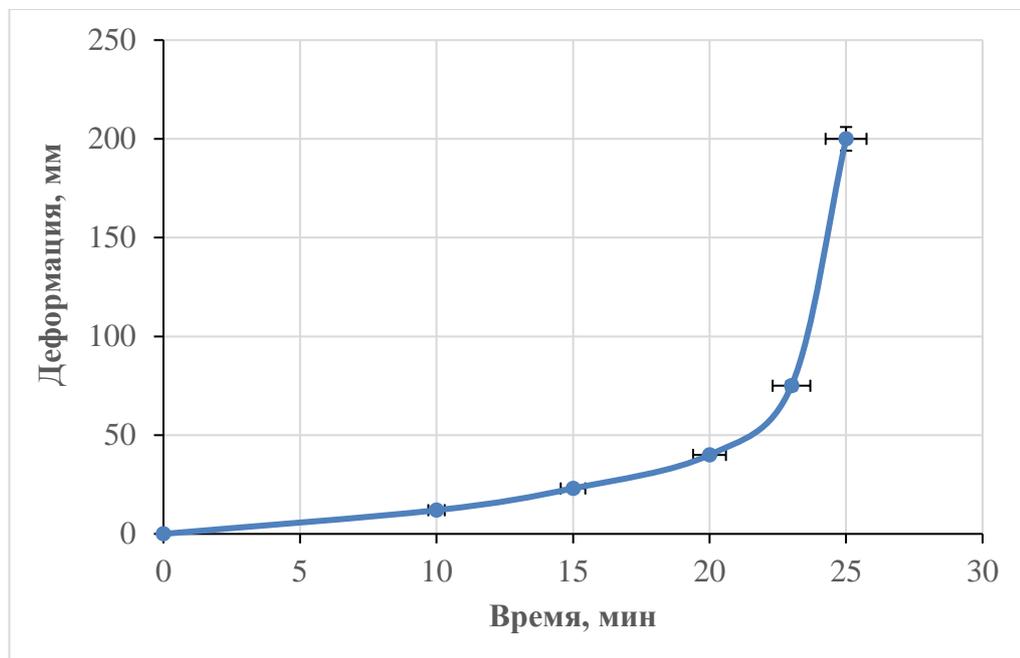


Рисунок 4.9 – Зависимость прогиба образца с покрытием ОЗС 3 (10% разбавителя) от времени теплового воздействия в огневой камере печи

Результаты испытаний по разработанному экспресс-методу также говорят о непригодности краски – структура ПК неоднородна, присутствуют крупные

газовые полости. Прочность и плотность слоя ПК вне этих дефектов повышена, величина адгезии к защищаемому материалу низкая.

Температурные кривые, полученные при испытании опытных образцов по ГОСТ 30247.0-94, представлены на рисунке 4.10.

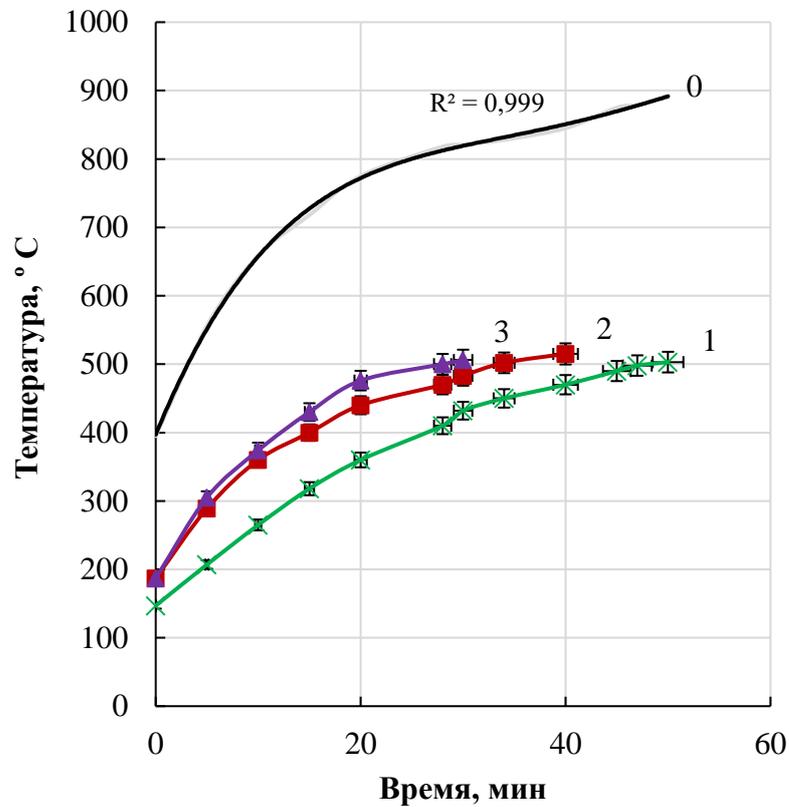


Рисунок 4.10 – Динамика изменения температуры в огневой камере (кривая 0) и температуры защищаемой поверхности в процессе испытания образцов, покрытых ОЗС 1–3 (соответственно кривые 1–3)

Результаты испытаний показывают, что чем больше время нагрева стальной подложки образца до критической температуры, тем выше показатель коэффициента вспучивания защитного слоя ПК и ниже показатель прочности ПК на сжатие (таблица 4.3, рисунок 4.11). Относительно высокая прочность ПК на сжатие, установленная по методу экспресс-анализа для образца, покрытого ОЗС 3, предполагает высокую плотность ПК (таблица 4.3) и увеличение теплопроводности защитного слоя, что, соответственно, способствует уменьшению времени достижения критической температуры подложки и подтверждается результатами испытаний по методике ГОСТ 30247.0-94 [65].

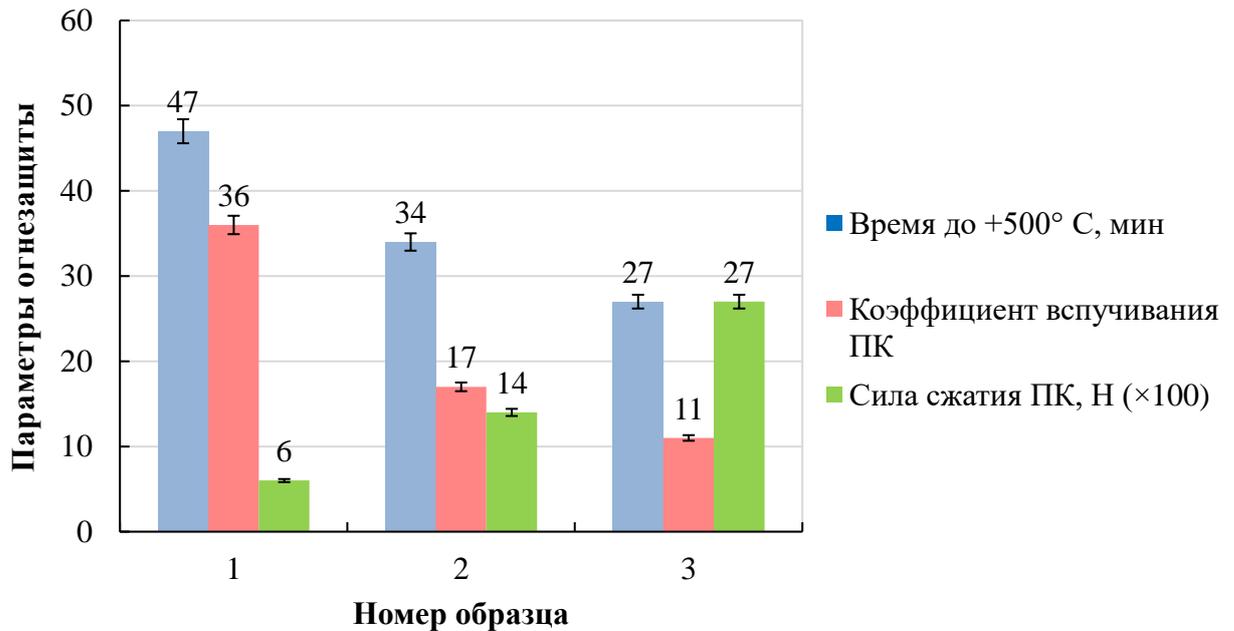


Рисунок 4.11 – Взаимозависимость параметров образцов, покрытых ОЗС 1–3 по результатам испытаний на огнестойкость согласно ГОСТ 30247.0-94 (параметр – время достижения критической температуры подложки) и экспресс-анализа (параметры – коэффициент вспучивания ОЗП, прочность ПК)

Результаты испытаний, независимо от применённых методик, делятся на три группы. К первой группе относятся результаты, полученные для покрытий качественной неразбавленной огнезащитной краской, по всем параметрам отвечающие требованиям нормативной документации. Ко второй группе – результаты испытания покрытий, не обеспечивающих заданные огнезащитные параметры. ПК при этом имеет ухудшенные характеристики: уменьшается коэффициент вспучивания и величина адгезии к подложке, увеличивается прочность и плотность. Результаты третьей группы испытаний имеют значительные отклонения от требуемых параметров.

4.4 Выводы по главе 4

Для проведения экспресс-анализа огнезащитных свойств интумесцентных покрытий вне лаборатории, на строительном объекте предложен комплект несложных

и недорогих приборов и приспособлений. Определены основные конструктивные требования и основные технологические и противопожарные требования к комплекту средств измерений.

Проведённые испытания огнезащитной эффективности ИП в соответствии с ГОСТ 53295-2009 на конструкциях двутаврового сечения, используемых в строительстве, подтверждают результативность методики экспресс-анализа.

Огнезащитное покрытие с параметрами (коэффициент вспучивания – 46, сила внедрения индентора в ПК (индентор диаметром 3 мм) – 0,059 Н; предел прочности на сжатие ПК – 8352 Н/м²; предел прочности на сдвиг приграничного слоя ПК от подложки – 2858 Н/м²; плотность ПК – 0,28 г/см³) обеспечивает необходимые характеристики для обеспечения огнезащиты.

К достоинствам методов экспресс-анализа ИП относится то, что в течение короткого промежутка времени выявляются предположительно некачественные участки покрытия в условиях строительного объекта [138]. Методика проста в исполнении, предполагает применение несложного и недорогого оборудования, не требует специальных лабораторных условий и энергозатрат, демонстрирует качество огнезащиты непосредственно на строительной конструкции.

В настоящее время, так как стандартизированным параметром ОЗП является только коэффициент вспучивания, методика экспресс-анализа позволяет проводить проверку этого параметра в условиях объекта защиты. Все остальные параметры предложенной системы показателей качества являются отправной базой для разработки серии нормативно-технических документов для проверки соответствия ОЗП в условиях их эксплуатации.

Разработанная методика может стать дополнением к методическим указаниям для работников аккредитованных испытательных лабораторий, в т.ч. ФГБУ СЭУ ФПС 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АКЗ	– антикоррозионная защита
ВНИИПО	– Всероссийский научно-исследовательский институт
МЧС России	противопожарной обороны МЧС России
ИП	– интумесцентное покрытие
КИП	– контрольно-измерительный прибор
$K_{всп}$	– коэффициент вспучивания
ПК	– пенококс
ОЗП	– огнезащитное покрытие
ОЗС	– огнезащитный состав
ОК	– огневая коробка
СП	– свод правил
ТЭП	– термоэлектрический преобразователь
ЧС	– чрезвычайная ситуация
ФЗ	– Федеральный закон

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 10.11.2024).
2. Контроль качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), ремонте и эксплуатации, прогнозирование срока службы тонкослойных огнезащитных покрытий / А. Ю. Лагозин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 1. С. 34–40. URL: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-1-34-40>.
3. Гаращенко А. Н., Кульков А. А., Страхов В. Л. Влияние срока эксплуатации на огнезащитную эффективность вспучивающихся покрытий и огнестойкость конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). С. 97–110. URL: <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2022-0-2-97-110>.
4. СП 433.1325800.2019. Огнезащита стальных конструкций. Правила производства работ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554694288> (дата обращения: 10.11.2024).
5. СП 2.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565248963> (дата обращения: 21.10.2024).
6. Law A. The role of modelling in structural fire engineering design // Fire Safety Journal. 2016. Vol. 80. Pp. 89–94. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.013>.
7. Maluk C., Woodrow M., Torero J. L. The potential of integrating fire safety in modern building design. Fire Safety Journal. 2017. Vol. 88. Pp. 104–112. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.006>.
8. Cadena J. E., Osorio A. F., Torero J. L., Reniers G., Lange D. Uncertainty-based decision-making in fire safety: Analyzing the alternatives. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 68. ID 104288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104288>.

9. Wang J. H., He J., Xiao Y. Fire behavior and performance of concrete-filled steel tubular columns: Review and discussion. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 15. Pp. 19–31. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.012>.
10. Lucherini A., Hidalgo J. P., Torero J. L., Maluk C. Influence of heating conditions and initial thickness on the effectiveness of thin intumescent coatings. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 120. ID 103078. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103078>.
11. Usmani A. S., Rotter J. M., Lamont S., Sanad A.M., Gillie M. Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects. *Fire Safety Journal*. 2001. Vol. 36(8). Pp. 721–744. URL: [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(01\)00037-6](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(01)00037-6).
12. Голованов В. И. Прогнозирование огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Голованов Владимир Ильич. М., 2008. 48 с.
13. Голованов В. И., Павлов В. В., Пехотиков А. В. Огнестойкость железобетонных изгибаемых конструкций, изготовленных по технологии постнапряжения // *Пожарная безопасность*. 2014. № 3. С. 122–131.
14. Gravit M., Shabunina D., Antonov S., Danilov A. Thermal Characteristics of Fireproof Plaster Compositions in Exposure to Various Regimes of Fire // *Buildings*. 2022. Vol. 12 (5). ID 630. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12050630>.
15. Голованов В. И., Пехотиков А. В., Павлов В. В. Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4 (101). С. 43–54.
16. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 162. ID 105712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>.
17. Zybina O., Gravit M. *Intumescent Coatings for Fire Protection of Building Structures and Materials*. Springer Series on Polymer and Composite Materials, XI – Springer Nature Switzerland AG, 2020. 210 p.
18. Мартынов А. В., Греков В. В., Попова О. В. Некоторые причины нарушения качества интумесцентных покрытий // *Безопасность труда в*

промышленности. 2020. № 11. С. 69–75. URL: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-11-69-75>.

19. Зыбина О. А., Варламов А. В., Мнацаканов С. С. Проблемы технологии коксообразующих огнезащитных композиций. Новосибирск: ЦРНС, 2010. 50 с.

20. Ненахов С. А., Пименова В. П. Физикохимия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 8. С. 11–58.

21. Maciulaitis R., Grigonis M., Malaikiene J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 98. Pp. 15–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.007>.

22. Bodzay B., Bocz K., Bárkai Z., Marosi G. Influence of rheological additives on char formation and fire resistance of intumescent coatings. *Polymer Degradation and Stability*. 2011. Vol. 96 (3). Pp. 355–362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.022>.

23. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016 Vol. 34 (2). Pp. 120–163. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>.

24. Григорьев Ю. А., Евтушенко Ю. М., Рудакова Т. А. Современные составы для огнезащитных покрытий интумесцентного типа // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 3. С. 38–42.

25. Liu Z., Dai M., Zhang Y., Gao X., Zhang Q. Preparation and performances of novel waterborne intumescent fire retardant coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2016. Vol. 95. Pp. 100–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.02.024>.

26. Liang S., Neisius N. M., Gaan S. Recent developments in flame retardant polymeric coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2013. Vol. 76 (11). Pp. 1642–1665. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.014>.

27. Mariappan T., Agarwal A., Ray S. Influence of titanium dioxide on the thermal insulation of waterborne intumescent fire protective paints to structural steel. *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 111. Pp. 67–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.04.036>.

28. Beraldo C. H. M., Silveira M. R. da S., Baldissera A. F., Ferreira C. A. Fire protection of ultraviolet-aged intumescent coatings containing polyhedral oligomeric silsesquioxanes. *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 149. ID 105903. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105903>.

29. Антонов А. В., Решетников И. С., Халтуринский Н. А. Горение коксообразующих полимерных систем // *Успехи химии*. 1999. Т. 68. № 7. С. 663–673.

30. Wail Edward D. Fire-Protective and Flame-Retardant Coatings – A State-of-the-Art Review. *Journal of Fire Sciences*. 2011. Vol. 29 (3). Pp. 259–296. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904110395469>.

31. Li G. Q., Zhang C., Lou G. B., et al. Assess the Fire Resistance of Intumescent Coatings by Equivalent Constant Thermal Resistance. *Fire Technology*. 2012. Vol. 48. Pp. 529–546. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-011-0243-8>.

32. Огнезащитная композиция для покрытия металлических конструкций: пат. № 1804082 С РФ, МПК С09D 5/18, С09D 123/34.: № 4866594/05: заявл. 24.07.1990: опубл. 20.08.1995 / К. М. Гибов, Л. Н. Шаповалова, А. П. Серебрянская; заявитель Институт химических наук АН Республики Казахстан, Производственное сотрудничество «Эластомер».

33. Полимерная композиция для огнезащитного вспенивающегося покрытия: пат. № 2103300 С1 РФ, МПК С09D 111/00, С09D 5/18.: № 95111314/04: заявл. 30.06.1995: опубл. 27.01.1998 / А. Н. Бондаренко, В. П. Васин, К. М. Гибов, Н. Ю. Евтихиева; заявитель ОАО «Научно-исследовательский институт стали».

34. Комплексная теплоогнезащита стального контейнера / В. П. Васин [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2009. Т. 18. № 6. С. 25–28.

35. Халтуринский Н. А., Рудакова Т. А. О механизме образования огнезащитных вспучивающихся покрытий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2013. № 8 (145). С. 220–227.

36. Amir N., Jali N. A., Ahmad F. Characterization and study of char performance of glass wool and rockwool hybrid fibre reinforced intumescent coatings. *ARPN Journal*

of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11 (20). Pp. 12268–12274. URL: http://www.arnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1016_5233.pdf.

37. Yan L., Xu Z., Wang X. Influence of nano-silica on the flame retardancy and smoke suppression properties of transparent intumescent fire-retardant coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 112. Pp. 319–329. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.07.017>.

38. De Sá S. C., de Souza M. M., Peres R. S., Zmozinski A. V., Braga R. M., de Araújo Melo D. M., Ferreira C. A. Environmentally friendly intumescent coatings formulated with vegetable compounds. *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 113. Pp. 47–59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.08.007>.

39. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017. Vol. 14. Pp. 1–20.

40. Еремина Т. Ю., Гравит М. В., Дмитриева Ю. Н. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 7. С. 52–56.

41. Еремина Т. Ю., Гравит М. В., Дмитриева Ю. Н. Назначение огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол и преимущества их использования // *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 8. С. 42–46.

42. ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Подготовка стальной поверхности перед нанесением лакокрасочных материалов и относящихся к ним продуктов. Визуальная оценка чистоты поверхности. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200111625>. (дата обращения: 10.11.2024).

43. Zhang Y., Wang Y., Bailey C. G., Taylor A. P. Global modelling of fire protection performances of an intumescent coating under different furnace fire conditions. *Journal of Fire Sciences*. 2012. Vol. 131 (1). Pp. 51–72. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904112453566>.

44. Horacek H., Pieh S. The importance of intumescent systems for fire protection of plastic materials. *Polymer International*. 2000. Vol. 49 (10). Pp. 1106–1114. URL: [https://doi.org/10.1002/1097-0126\(200010\)49:10<1106::aid-pi539>3.0.co;2-i](https://doi.org/10.1002/1097-0126(200010)49:10<1106::aid-pi539>3.0.co;2-i).

45. Bourbigot S., Duquesne S. Fire retardant polymers: recent developments and opportunities. *Journal of Materials Chemistry*. 2007. Vol. 17 (22). Pp. 2283–2300. URL: <https://doi.org/10.1039/b702511d>.

46. Wang L., Dong Y., Zhang C. et al. Experimental Study of Heat Transfer in Intumescent Coatings Exposed to Non-Standard Furnace Curves. *Fire Technology*. 2015. Vol. 51. Pp. 627–643. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0460-7>.

47. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Intumescent fire protective coating: toward a better understanding of their mechanism of action. *Thermochimica Acta*. 2006. Vol. 449 (1–2). Pp. 16–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.07.008>.

48. Bourbigot S., Le Bras M., Duquesne S., Rochery M. Recent Advances for Intumescent Polymers. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2004. Vol. 289(6). Pp. 499–511. URL: <https://doi.org/10.1002/mame.200400007>.

49. Oliveira R. B. R. S., Moreno, Junior A. L., Vieira L. C. M. Intumescent paint as fire protection coating. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2017. Vol. 10 (1). P. 220–231. URL: <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000100010>.

50. Griffin G. J., Bicknell A. D., Brown T. J. Studies on the Effect of Atmospheric Oxygen Content on the Thermal Resistance of Intumescent, Fire-Retardant Coatings. *Journal of Fire Sciences*. 2005. Vol. 23 (4). Pp. 303–328. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904105048598>.

51. Marosi Anna P., Bourbigot G. S., Le Bras M., Delobel R. Intumescent flame retardant systems of modified rheology. *Polymer Degradation and Stability*. 2002. Vol. 77 (2). Pp. 243–247. URL: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(02\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(02)00040-x).

52. Neininger S. M., Staggs J. E. J., Horrocks A. R., Hill N. J. A study of the global kinetics of thermal degradation of a fibre-intumescent mixture. *Polymer Degradation and Stability*. 2002. Vol. 77 (2). Pp. 187–194. URL: [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(02\)00033-2](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(02)00033-2).

53. Reshetnikov I. S., Yablokova M. Y., Khalturinskij N. A. Influence of surface structure on thermoprotection properties of intumescent systems. *Applied Surface Science*. 1997. Vol. 115 (2). Pp. 199–201. URL: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(97\)80205-x](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(97)80205-x).

54. Delobel R., Le Bras M., Ouassou N. Fire retardance of polypropylene by diammonium pyrophosphate-pentaerythritol: spectroscopic characterization of the protective coatings. *Polymer Degradation and Stability*. 1990. Vol. 30. Pp. 41–56. URL: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(90\)90116-O](https://doi.org/10.1016/0141-3910(90)90116-O).

55. Delobel R., Ouassou N., Le Bras M., Leroy J. M. Fire retardance of polypropylene: action of diammonium pyrophosphate-pentaerythritol intumescent mixture. *Polymer Degradation and Stability*. 1989. Vol. 23. Pp. 349–357. URL: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(89\)90057-8](https://doi.org/10.1016/0141-3910(89)90057-8).

56. Camino G., Costa L., Trossarelli L. Study of the mechanism of intumescence in fire retardant polymers: Part I – Thermal degradation of ammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures. *Polymer Degradation and Stability*. 1984. Vol. 6 (4). Pp. 243–252. URL: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(84\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0141-3910(84)90004-1).

57. Camino G., Costa L., Trossarelli L. Study of the mechanism of intumescence in fire retardant polymers: Part V – Mechanism of formation of gaseous products in the thermal degradation of ammonium polyphosphate. *Polymer Degradation and Stability*. 1985. Vol. 12 (3). Pp. 203–211. URL: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(85\)90089-8](https://doi.org/10.1016/0141-3910(85)90089-8).

58. Lucherini A., Maluk C. Assessing the onset of swelling for thin intumescent coatings under a range of heating conditions. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 106. Pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.014>.

59. Математическое моделирование теплофизических и термохимических процессов при горении вспучивающихся огнезащитных покрытий / В. Л. Страхов [и др.] // *Физика горения и взрыва*. 2001. № 2. С. 43–47.

60. Пути снижения температуры пенообразования в системе полифосфат аммония-пентаэритрит в интумесцентных системах / Т. А. Рудакова [и др.] // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 3. С. 24–31.

61. Способ получения огнезащитного покрытия на поверхности горючих и негорючих материалов, микрокапсулированный агент для создания огнезащитного покрытия на поверхности горючих и негорючих материалов, способ его получения и способ создания огнезащитного вспучивающегося покрытия: пат. 2580132 РФ / В. И. Забегаев; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.04.2016.

62. Обеспечение пожарной безопасности производственных объектов. Исследования и разработка нормативных документов ФГБУ ВНИИПО МЧС России в области предупреждения пожаров и взрывов / Д. М. Гордиенко [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 6. С. 5–20. URL: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-6-5-20>.

63. Dreyer Jochen A. H., Weinell Claus Erik, Dam-Johansen Kim, Kiil Søren. Review of heat exposure equipment and in-situ characterisation techniques for intumescent coatings. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 121. ID 103264. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103264>.

64. Ariyanayagam A. D., Mahendran M. Development of realistic design fire time-temperature curves for the testing of cold-formed steel wall systems. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2014. Vol. 8 (4). Pp. 427–447. URL: <https://doi.org/10.1007/s11709-014-0279-1>.

65. ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9055248> (дата обращения: 15.05.2023).

66. Barnett C. R. Replacing international temperature–time curves with BFD curve. *Fire Safety Journal*. 2007. Vol. 42(4). Pp. 321–327. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.11.001>.

67. Barnett C. R. BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures. *Fire Safety Journal*. 2002. Vol. 37 (5). Pp. 437–463. URL: [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(02\)00006-1](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(02)00006-1).

68. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. High-Throughput Fire Testing for Intumescent Coatings. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2006. Vol. 45 (22). Pp. 7475–7481. URL: <https://doi.org/10.1021/ie0608410>.

69. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., et al. Variation of Intumescent Coatings Revealing Different Modes of Action for Good Protection Performance. *Fire Technology*. 2017. Vol. 53. Pp. 1569–1587. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0649-z>.

70. Zeng Y., Weinell C.E., Dam-Johansen K., Ring L., Kiil S. Exposure of hydrocarbon intumescent coatings to the UL1709 heating curve and furnace rheology: Effects of zinc borate on char properties. *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 135. Pp. 321–330. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.020>.

71. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 95. Pp. 42–50. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.004>.

72. Zhang Y., Wang Y. C., Bailey C. G., Taylor A. P. Global modelling of fire protection performance of an intumescent coating under different furnace fire conditions. *Journal of Fire Safety*. 2013. Vol. 31. Pp. 51–72. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904112453566>.

73. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., ScharTEL B. Size is not all that matters: Residue thickness and protection performance of intumescent coatings made from different binders. *Journal of Fire Sciences*. 2017. Vol. 35 (4). Pp. 284–302. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904117709479>.

74. Omrane A., Wang Y. C., Göransson U., Holmstedt G., Aldén M. Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence. *Fire Safety Journal*. 2007. Vol. 42. Pp. 68–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.08.006>.

75. Zhang Y., Wang Y. C., Bailey C. G., Taylor A. P. Global modelling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions. *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 50. Pp. 51–62. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.02.004>.

76. Cirpici B. K., Wang Y. C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 81. Pp. 74–84. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>.

77. Cirpici B. K., Wang Y. C., Rogers B. D., Bourbigot S. A theoretical model for quantifying expansion of intumescent coating under different heating conditions. *Polymer*

Engineering & Science. 2016. Vol. 56 (7). Pp. 798–809. URL: <https://doi.org/10.1002/pen.24308>.

78. Wang Z., Han E., Liu F., Ke W. Fire and Corrosion Resistances of Intumescent Nano-coating Containing Nano-SiO₂ in Salt Spray Condition. *Journal of Materials Science & Technology*. 2010. Vol. 26 (1). Pp. 75–81. URL: [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(10\)60012-6](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(10)60012-6).

79. Viskanta R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1993. Vol. 6 (2). Pp. 111–134. URL: [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(93\)90022-b](https://doi.org/10.1016/0894-1777(93)90022-b).

80. Dreyer J. A. H., Poli M., Eaves N. A., Botero M. L., Akroyd J., Mosbach S., Kraft M. Evolution of the soot particle size distribution along the centreline of an n-heptane/toluene co-flow diffusion flame. *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 209. Pp. 256–266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.08.002>.

81. Krüger S., Gluth G. J. G., Watolla M.-B., Morys M., Häßler D., Schartel B. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen. *Bautechnik*. 2016. Vol. 93 (8). Pp. 531–542. URL: <https://doi.org/10.1002/bate.201600032>.

82. Ng Y. H., Dasari A., Tan K. H., Qian L. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of testing. *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 150. ID 105985. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105985>.

83. Андрюшкин А. Ю., Цой А. А., Симонова М. А. Об основных предпосылках метода испытаний огнезащитных покрытий в высокотемпературных газовых потоках // Проблемы управления рисками в техносфере. 2016. № 1 (37). С. 39–46.

84. Акулов А. Ю., Аксёнов А. В. Огнезащитные покрытия на основе минеральных термостойких наполнителей для металлоконструкций нефтегазового комплекса // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2011. № 1. С. 66–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16452823>.

85. Гаращенко А. Н., Берлин А. А., Кульков А. А. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из

полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30. URL: <https://doi.org/10.18322/PVB.2019.28.02.9-30>.

86. Моделирование влияния режимов огневого воздействия на эффективность вспучивающихся огнезащитных покрытий / А. Н. Гаращенко [и др.] // Вопросы оборонной техники. 2020. Т. 15. № 3–4. С. 75–84.

87. Reshetnikov I. S., Antonov A. V., Khalturinskii N. A. Mathematical description of combustion of intumescent polymer systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1997. Vol. 33. No. 6. Pp. 669–684. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02671799>.

88. Мартынов А. В., Попова О. В., Греков В. В. Нестандартные методы оценки качества интумесцентных покрытий // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 6. С. 15–20. URL: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-6-15-20>.

89. Yew M. C., Ramli Sulong N. H., Yew M. V., et al. Influences of flame-retardant fillers on fire-protection and mechanical properties of intumescent coatings. *Progress in organic coatings*. 2015. Vol. 78. Pp. 59–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.10.006>.

90. Bozzoli F., Mocerino A., Rainieri S., Vocale P. Inverse heat transfer modeling applied to the estimation of the apparent thermal conductivity of an intumescent fire retardant paint. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. Vol. 90. Pp. 143–152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.exphemflusci.2017.09.006>.

91. Maluk C., Bisby L., Krajcovic M., Torero J. L. A Heat-Transfer Rate Inducing System (H-TRIS) Test Method. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 105. Pp. 307–319.

92. Березовский А. И., Маладыка И. Г. Определение коэффициента вспучивания и прочностных характеристик вспученного слоя огнезащитных вибростойких покрытий для противопожарной защиты металлических элементов и конструкций // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2013. № 1 (17). С. 59–67.

93. Ненахов С. А., Пименова В. П. Влияние концентрации газообразующего агента на закономерности развития пенококса огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 1. № 3. С. 14–26.

94. Рыбка Е. А., Андронов В. А. Лабораторная установка для оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий для металлических конструкций с учётом параметров развития реального пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 10. С. 19–24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16902909>.

95. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating. *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201 (3–4). Pp. 979–987.

96. Reshetnikov I. S., Garashchenko A. N., Strakhov V. L. Experimental investigation into mechanical destruction of intumescent chars. *Polymers for Advanced Technologies*. 2000. Vol. 11 (8–12). Pp. 392–397.

97. Morys M., Illerhaus B., Sturm H., Scharfel B. Revealing the inner secrets of intumescence: Advanced standard time temperature oven (STT Mufu+)-μ-computed tomography approach. *Fire and Materials*. 2017. Vol. 41 (8). Pp. 927–939. URL: <https://doi.org/10.1002/fam.2426>.

98. Гравит М. В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 5. С. 33–37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419639>.

99. Зверев В. Г., Теплоухов А. В., Цимбалюк А. Ф. Исследование свойств и огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8–2. С. 148–153.

100. Порядок осуществления контроля за соблюдением нормативных требований к средствам огнезащиты и их применению: методическое руководство. М.: ВНИИПО, 2010. 11 с.

101. Оценка качества огнезащиты и установление вида огнезащитных покрытий на объектах: руководство / Н. В. Смирнов [и др.]. М.: ВНИИПО, 2011. 39 с.

102. 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. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37317752>.

103. Зыбина О. А. Адгезия огнезащитных вспучивающихся полимерных материалов к поверхности металлических конструкций при повышенных температурах: дис... канд. техн. наук: 05.17.06 / Зыбина Ольга Александровна. СПб., 2004. 143 с.

104. Диагностика качества нанесения и эффективности коксообразующих огнезащитных покрытий для металлоконструкций / О. Э. Бабкин [и др.] // Промышленные покрытия. 2014. № 7–8. С. 50–54.

105. Morys M., Häßler D., Krüger S., Schartel B., Hothan S. Beyond the standard time-temperature curve: assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 112. ID 102951. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102951>.

106. Gardelle B., Duquesne S., Rerat V., Bourbigot S. Thermal degradation and fire performance of intumescent silicone-based coatings. *Polymers for Advanced Technologies*. 2012. Vol. 24 (1). Pp. 62–69. URL: <https://doi.org/10.1002/pat.3050>.

107. Wang L. L., Wang Y. C., Yuan J. F., Li G. Q. Thermal conductivity of intumescent coating char after accelerated aging. *Fire and Materials*. 2012. Vol. 37(6). Pp. 440–456. URL: <https://doi.org/10.1002/fam.2137>.

108. Bartholmai M., Schartel B. Assessing the performance of intumescent coatings using bench-scaled cone calorimeter and finite difference simulations. *Fire and Materials*. 2007. Vol. 31(3). Pp. 187–205. URL: <https://doi.org/10.1002/fam.933>.

109. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 116. ID 103200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103200>.

110. Naik A. D., Duquesne S., Bourbigot S. Hydrocarbon time–temperature curve under airjet perturbation: An in situ method to probe char stability and integrity in reactive fire protection coatings. *Journal of Fire Sciences*. 2016. Vol. 34(5). Pp. 385–397. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904116658049>.

111. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу: методика. М.: ВНИИПО, 1998. 15 с.

112. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071913> (дата обращения: 15.05.2023).

113. ГОСТ 31993-2013 (ISO 2808:2007). Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104266> (дата обращения: 15.05.2023).

114. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100941> (дата обращения: 15.05.2023).

115. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071912> (дата обращения: 15.05.2023).

116. Горбунов А. С., Коровченко А. В., Ахметшин И. Ф. Методики приемки работ по огнезащитной обработке металлических конструкций // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 29–32.

117. ГОСТ 31993-2013 (ISO 2808:2007). Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104266> (дата обращения: 15.05.2023).

118. ГОСТ 166-89 (ИСО 3599-76). Штангенциркули. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012675> (дата обращения: 15.05.2023).

119. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высшая школа, 1985. 328 с.

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

121. 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.

122. 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 и жизнедеятельности», 26–27 марта 2021 года, г. Ростов-на-Дону).

123. 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.

124. Li G.-Q., Han J., Lou G.-B., Wang Y. C. Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. Part A. Pp. 177–184. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.008>.

125. Li G., Han J., Wang Y. C. Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results. *Journal of Fire Sciences*. 2017. Vol. 35(2). Pp. 132–155. URL: <https://doi.org/10.1177/0734904117693857>.

126. 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.

127. Мартынов А. В., Греков В. В. Тонкослойная огнезащита металлоконструкций // Наука и Мир. 2019. Т. 2. №3(67). С. 19–22. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43144512_37525918.pdf (дата обращения: 11.05.2023).

128. Малогабаритный прибор для экспресс-оценки огнезащитных свойств огнезащитной обработки древесины: пат. 2548386 РФ, МПК G01N 25/00; A62C 99/00 / Н. В. Смирнов, Ю. В. Точилкин, А. С. Етумян, И. В. Северин; заявитель и

патентообладатель ФГБУ ВНИИПО МЧС России. № 2013151567/28; заявл. 19.11.2013; опубл. 20.04.2015; Бюл. № 11.

129. Мартынов А. В., Греков В. В. К вопросу о материальном балансе пенококса // Наука и Мир. 2019. Т. 2. № 5(69). С. 51–53. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43774043_81414925.pdf (дата обращения: 11.05.2023).

130. Ненахов С. А. Пименова В. П. Экспериментальное изучение влияния толщины вспениваемых покрытий на огнезащитную эффективность // Пожаровзрывобезопасность. 2011. № 5. С. 2–9.

131. Натейкина Л. И. Минимальная толщина огнезащитного покрытия вспенивающегося типа // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 3. С. 22–24.

132. Головина Е. В. Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Головина Екатерина Валерьевна. Екатеринбург, 2019. 130 с.

133. 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.: Изд. «Интернаука», 2025. С. 5–12.

134. 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. URL: <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>.

135. 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. URL: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-9-66-73>.

136. 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.

137. 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. URL: <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-38-46> (дата обращения: 30.09.2024).

138. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

(обязательное)

**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ
РАБОТЫ**

«Утверждаю»
 Главный инженер ООО «СКБ»
 М.Г. Дорошенко

 2021г.



**АКТ
 внедрения результатов научно-исследовательских
 и технологических работ**

Предприятие внедрения: ООО «СКБ», г. Ростов-на-Дону
 Разработчики: аспирант А.В. Мартынов, технический консультант В.В. Греков.

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской и технологической работы «разработка способа контроля интумесцентного покрытия на строительном объекте», выполненной аспирантом Мартыновым А.В. внедрены в ООО «СКБ», г. Ростов-на-Дону.

Вид внедрения результатов: опытные образцы огневой коробки для вспучивания покрытия и приборов для измерения прочности и адгезии пенококса с комплектом технической документации переданы ООО «СКБ», г. Ростов-на-Дону.

Характеристика предмета внедрения: огневая коробка для вспучивания краски, прибор для измерения прочности. Прибор для измерения адгезии пенококса в виде экспериментальных образцов.

Рекомендации содержат подробное описание технических условий эксплуатации.

Форма внедрения: передача для испытаний и доработки разработанного образца технологической документации.

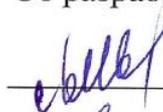
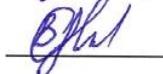
Научно-технический эффект: повышение пожарной безопасности эксплуатации металлоконструкций за счёт выявления непосредственно на объекте и исключения приёмки некачественных интумесцентных покрытий.

От ООО «СКБ»


 Е.О. Аникина

 А.С. Тогучев

От разработчиков:


 А.В. Мартынов

 В.В. Греков

ООО «МИК»

ИНН 7726726765, КПП 772701001, Р/сч № 40702810838060017477 в ПАО «Сбербанк России», К/сч № 30101810400000000225, БИК 044525225, ОКПО 17863800, ОГРН 1137746688859, адрес: 117624, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Южное Бутово, ул. Изюмская, д. 57 к. 2, этаж/помещ. 1/XIII, ком.1
e-mail: info@mik-group.ru, тел: 8(499)397-80-29

Общество с Ограниченной Ответственностью «МИК»

Утверждаю»
Генеральный директор
ООО «МИК»
Шербосев Д.А.



АКТ

внедрения результатов научно-исследовательских и технологических работ

Предприятие внедрения: ООО «МИК»

Разработчики: доцент, д.т.н. О.В.Попова, аспирант А.В.Мартынов, технический консультант В.В. Греков.

Настоящим актом подтверждается, что в производство ООО «МИК» внедрен комплект приборов для экспресс-оценки скрытых параметров качества интумесцентных покрытий вне лаборатории на строительном объекте.

Характеристика предмета внедрения:

Комплект приборов состоит из огневой коробки, прибора для оценки прочности пенококса и прибора для оценки адгезии пенококса.;

- технологическая инструкция содержит рекомендации по работе с комплектом приборов.

Вид внедрения результатов: передача ООО «МИК» экспериментального варианта комплекта приборов и технологической инструкции по работе с ним.

Форма внедрения: передача для применения комплекта приборов и технологической инструкции.

Результаты внедрения в опытном применении ООО «МИК»:

-Комплект приборов позволяет обнаруживать скрытые (неявные) дефекты огнезащитного покрытия непосредственно на объекте;



ООО «Лаборатория «Евростиль»»

141140, Московская область, г.Лосино-Петровский,
 рп. Свердловский, ул. Центральная, д.1
 www.nashakraska.ru , info@nashakraska.ru
 тел.: +7(495) 510-53-63, +7(495) 526-59-77

«Утверждаю»



Генеральный директор
 ООО «Лаборатория «Евростиль»»

О.Ю.Чалов
 «30» октября 2021г.

АКТ

Внедрения результатов научно-исследовательских и технологических работ.

Предприятие внедрения: ООО «Лаборатория «Евростиль». г. Москва.

Разработчики: аспирант ДГТУ А.В. Мартынов, тендерный консультант ООО «СКБ» В.В. Греков

Настоящим актом подтверждается, что ООО «Лаборатория «Евростиль» предоставлен комплект оборудования для внелабораторной оценки качества интумесцентных покрытий на строительном объекте.

Характеристика предмета внедрения:

- комплект оборудования для внелабораторной оценки качества интумесцентных покрытий на строительном объекте;
- технологическая инструкция содержит основные положения по конструкции и работе с комплектом приборов.

Форма внедрения: передача в производство экспериментальных образцов и технологической инструкции.

Результаты внедрения в опытном производстве ООО «Лаборатория «Евростиль»:

- повышение пожарной безопасности эксплуатации металлоконструкций за счёт выявления непосредственно на объекте и исключения приёмки некачественных интумесцентных покрытий.

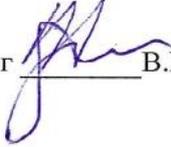
Научно-технический эффект: возможность выявления скрытого брака интумесцентных покрытий на стадии приёмки покрытий на строительном объекте путём выявления скрытых(неявных) свойств покрытий.

Рекомендации:

1. Комплект приборов следует применять непосредственно на строительном объекте, исключая этапы транспортировки образцов покрытия и испытаний в лаборатории.
2. Необходимо разработать поправки в нормативную документацию для обязательной оценки качества покрытий непосредственно на объекте.

3. Следует разработать коммерческий вариант комплекта приборов для возможности широкого внедрения на строительных объектах.

От ООО «Лаборатория «Евростиль»

Гл. технолог  В.В. Туров

От разработчиков

 А.В. Мартынов

 В.В. Греков