

На правах рукописи



ПАНЕВ НИКИТА МИХАЙЛОВИЧ

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ОГНЕЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ
ДРЕВЕСИНЫ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ИХ НАЛИЧИЯ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена на кафедре пожарной безопасности объектов защиты (в составе учебно-научного комплекса «Государственный надзор») ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС России»

Научный руководитель: **Никифоров Александр Леонидович,**
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Сафин Руслан Рушанович,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой архитектуры и
дизайна изделий из древесины ФГБОУ
ВО «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет», г. Казань

Котлов Виталий Геннадьевич,
советник РААСН,
кандидат технических наук, профессор,
директор института строительства и
архитектуры ФГБОУ ВО «Поволжский
государственный технический
университет», г. Йошкар-Ола

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Уральский институт
Государственной противопожарной
службы МЧС России», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «20» ноября 2020 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, Шереметевский проспект, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета www.ivgpu.com.

Автореферат разослан « » _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.355.01
кандидат технических наук, доцент

 Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы.

На сегодняшний день одним из наиболее распространённых строительных материалов является древесина и её производные. Можно с уверенностью сказать, что древесина долгие годы будет востребована в связи с её свойствами: экологичностью, простотой механической обработки, прочностью, а также возобновляемостью ресурсов. Над проблемными вопросами применения изделий из древесины в строительстве работали такие ученые, как С.Н. Горшин, Б.В. Лабудин, Р.Р. Сафин, С.В. Федосов, В.И. Жаданов, В.Г. Котлов, И.С. Инжутов и др.

Основным недостатком древесины является её высокая пожарная опасность. На основании нормативных документов, а также мирового исследовательского опыта можно сказать о том, что требуемый уровень пожарной безопасности строительных материалов и изделий можно обеспечить с помощью применения средств огнезащиты, к которым относятся вспучивающиеся краски, а также огнезащитные средства (далее – ОЗС) и огнебиозащитные составы (далее – ОБЗС) для поверхностной и глубокой пропитки изделий из древесины. В области разработки и совершенствования подобных составов в разные годы работали П. Лохтин, Ф.Т. Бабаев, А.А. Леонович, Н.А. Тычино, Е.Н. Покровская, Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, Ю.К. Нагановский, В.И. Голованов, Ю.А. Щепочкина и др. Известны работы таких иностранных авторов, как R.H. White, Janguang Cui, Changjiang Zhu, Gao Tianhong, Lei Song, Qilon Tai, Mingshan He, H.Farooq и др. При этом следует отметить тот факт, что, несмотря на большое количество разработок в области огнезащиты древесины, отсутствует единый подход к вопросам, связанным с научным обоснованием использования различных антипиренирующих составов. Так, при использовании вспучивающихся покрытий обеспечивается значительное снижение пожарной опасности древесины, но не обеспечивается устойчивость материала к биодеструкции. Глубокая пропитка древесины повышает её устойчивость к воздействию опасных факторов пожара (далее – ОФП) и биологическому разрушению, но для реализации на практике требует использования крупногабаритного, энергозатратного и дорогого оборудования (ванн, автоклавов и др.). Поверхностная пропитка древесины ОЗС обеспечивает глубину проникновения, необходимую для огнезащиты материала. Такая технология отличается простотой реализации на практике и является наиболее приемлемой для массового использования.

Также стоит отметить, что влияние индивидуальных антипиренов на пожарную опасность древесины практически не изучено. Это не позволяет реализовать научный подход при разработке и оптимизации составов, предназначенных для снижения пожароопасных характеристик древесины и строительных материалов на её основе.

Ещё одним важным вопросом, связанным с использованием ОЗС, является определение наличия антипиренов на деревянных строительных изделиях при осуществлении надзора за соблюдением требований пожарной безопасности, а также при расследовании пожаров. Существующие методики сложны, требуют

больших затрат времени и ручного труда, а также ориентированы на использование дорогостоящих приборов. Более простые устройства нельзя отнести к приборам экспресс-контроля, а их возможности не отвечают требованиям высокой производительности, надёжности и простоты использования.

Таким образом, актуальность работы обусловлена следующими факторами:

1) на сегодняшний день нет подтверждённых экспериментальным путём данных об огнезащитной эффективности отдельных химических веществ, выступающих в роли антипиренов;

2) перед надзорными органами стоит задача по контролю качества проводимых противопожарных мероприятий, в частности, определение наличия огнезащитных составов на поверхности древесины;

3) при расследовании пожаров возникает необходимость установления факта наличия ОЗС на сгоревших или повреждённых строительных изделиях.

Цель работы – оценка эффективности антипиренов, входящих в состав ОЗС, на основе показателей пожарной опасности, а также разработка метода оценки наличия антипиренов на строительных изделиях из древесины до и после пожара.

Задачи, поставленные при выполнении работы:

1) выявление наиболее распространённых индивидуальных антипиренов, используемых в рецептуре ОЗС и оценка их огнезащитной эффективности;

2) создание математической модели, описывающей процесс термодеструкции древесины, прошедшей поверхностную огнезащитную пропитку;

3) разработка методики определения наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины до и после пожара;

4) разработка экспресс-метода и устройства контроля наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины.

Научная новизна:

1) экспериментально установлены значения кислородного индекса древесины, прошедшей огнезащитную обработку индивидуальными антипиренами;

2) впервые произведено ранжирование антипиренов по показателю кислородного индекса древесины, прошедшей поверхностную огнезащитную пропитку;

3) разработана математическая модель, позволяющая оценить процесс термодеструкции древесины, обработанной ОЗС, в условиях пожара;

4) предложен метод неразрушающего контроля наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины.

Теоретическая значимость работы:

1) проведена оценка пожарной опасности древесины, обработанной индивидуальными соединениями, которые запатентованы в качестве ОЗС для поверхностной пропитки древесины;

2) разработан метод, позволяющий оценить качество огнезащитной поверхностной пропитки на строительных изделиях из древесины;

3) предложена модель, описывающая процесс термодеструкции древесины, обработанной ОЗС.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1) использование её результатов позволит осуществлять обоснованный выбор антипиренов при составлении рецептур ОЗС для древесины;

2) использование её результатов позволит проводить оценку наличия ОЗС как на эксплуатируемых строительных изделиях из древесины, так и на сгоревших объектах;

3) использование её результатов позволит добиться снижения ущерба от пожаров в зданиях и сооружениях, построенных с применением строительных изделий из древесины;

4) результаты работы внедрены в практическую деятельность Федерального Государственного бюджетного учреждения «Судебно-экспертное учреждение Федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» по Липецкой области», а также в образовательный процесс кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС России» по дисциплинам «Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре», «Пожарная безопасность объектов защиты», «Строительные материалы и конструкции и их поведение при возникновении ЧС».

Методы исследования.

Поставленные задачи решались путем теоретических и экспериментальных исследований. Основу теоретических исследований составлял анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных изучению поведения изделий из древесины в условиях пожара, выявления закономерностей, их описания и обобщения. Экспериментальные исследования включали в себя применение лабораторных методов испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1) данные о пожарной опасности древесины, обработанной антипиренами, применяемыми при производстве ОЗС для поверхностной пропитки деревянных строительных изделий;

2) математическая модель теплопереноса в системе «источник высокой температуры-ОЗС-древесина»;

3) основные положения методики контроля наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины до и после пожара;

4) техническое устройство для проведения контроля наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием современных физико-химических и химических методов исследования: метод определения кислородного индекса, метод инфракрасной спектроскопии. Эксперименты проводились на сертифицированном и поверенном оборудовании. Достоверность результатов также подтверждается внутренней непротиворечивостью полученных данных.

Личный вклад диссертанта состоит в сборе информации, касающейся применяемых ОЗС и ОБЗС, проведении лабораторных исследований древесины,

обработанной различными ОЗС, разработке метода и устройства для проверки наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины, а также в обработке полученных данных с последующим формированием выводов.

Апробация результатов.

Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях:

1) X Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность» (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2015);

2) V Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016» (Москва, АГПС МЧС России, 2016);

3) Межвузовская научно-техническая конференция аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2016)» (Иваново, ИВГПУ, 2016);

4) XIX Международный научно-практический форум «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2016)» (Иваново, ИВГПУ, 2016);

5) «Школа молодых учёных и специалистов МЧС России – 2016» (Воронеж, Воронежский институт ГПС МЧС России, 2016);

6) XI Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность», посвященная году Пожарной Охраны России (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2016);

7) IV Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов», посвященная Году гражданской обороны (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2016);

8) Межвузовская научно-техническая конференция аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2017)» (Иваново, ИВГПУ, 2017);

9) XII Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность», посвященная Году гражданской обороны (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2017);

10) Межвузовская (с международным участием) молодёжная научно-техническая конференция «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК-2018)» (Иваново, ИВГПУ, 2018);

11) II Международная научно-практическая конференция «Современные пожаробезопасные материалы и технологии – 2018» (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2018);

12) XIII Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность», посвященная Году культуры безопасности (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2018);

13) Межвузовская (с международным участием) молодёжная научно-техническая конференция «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК-2019)» (Иваново, ИВГПУ, 2019);

14) XIV Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность», посвященная 370-летию Пожарной охраны России (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2019).

15) III Международная научно-практическая конференция «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», посвященная 370-й годовщине образования пожарной охраны России (Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2019).

Публикации.

По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 5 работ в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также 16 работ в изданиях (15 – в сборниках материалов конференций и 1 – в журнале), не включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объём диссертации.

Диссертация изложена на 144 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, а также приложений. Включает в себя 43 рисунка и 83 таблицы, список литературы содержит 140 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности полученных результатов и сведения об апробации результатов выполненной работы.

В первой главе **«Обзор современного состояния вопроса огнезащиты древесины и контроля её наличия»** рассмотрены основные способы конструктивной и химической огнезащиты древесных строительных материалов, в частности, приведён анализ составов для поверхностной огнезащитной пропитки древесины, применяемых на сегодняшний день в Российской Федерации.

Установлено, что наиболее часто при разработке рецептур ОЗС применяются неорганические соли. Отмечено, что большинство огнезащитных композиций имеют в своём составе большое количество компонентов. Это не всегда влияет на эффективность огнезащиты, но всегда ведёт к удорожанию готовой продукции.

Выявлено, что на сегодняшний день не существует способа обнаружения огнезащитного покрытия непосредственно на объекте защиты.

Во второй главе **«Оценка показателей кислородного индекса образцов древесины»** обоснован выбор объектов исследования, а также проведена оценка пожарной опасности образцов древесины, обработанной различными ОЗС, путём

определения кислородного индекса (далее – КИ) материала согласно ГОСТ 12.1.044-89.

В качестве объектов исследования были выбраны:

1. Сосновая древесина, т.к. она имеет наименьшую среднюю стоимость среди наиболее распространённых на территории Российской Федерации пород древесины (по данным Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации, только лиственница превосходит сосну по запасам древесины в России).

2. Химические вещества, применяемые при производстве ОЗС и ОБЗС:

- а) жидкое стекло – раствор щелочных силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$;
- б) аммоний фосфорнокислый двузамещенный (диаммонийфосфат) $((\text{NH}_4)_2\text{H}_3\text{PO}_4)$;
- в) карбамид (мочевина) – диамид угольной кислоты;
- г) сода пищевая (гидрокарбонат натрия NaHCO_3) – кислая соль угольной кислоты и натрия;
- д) бишофит ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) – минерал (магниевая соль), который широко используется в народном хозяйстве, строительстве и в медицине.

КИ – это минимальное содержание кислорода в кислородно-азотной смеси, при котором возможно свечеобразное горение материала в условиях специальных испытаний.

КИ (% об.) вычисляют по формуле:

$$КИ = C_k + K \cdot d \quad (1)$$

где: C_k – конечное значение концентрации кислорода, % об., определяется как минимальное значение концентрации кислорода, при котором наблюдалось самостоятельное горение образца;

d – разница между значениями концентрации кислорода, % об.;

K – коэффициент, принимаемый в зависимости от полученных результатов согласно данным таблицы 1 ГОСТ 12.1.044-89.

Далее полученные значения КИ проверялись на стандартное отклонение путём проверки на удовлетворение соотношению:

$$(2/3)\sigma < d < (3/2)\sigma \quad (2)$$

где: $d = 0,2$ % об. – шаг изменения концентрации кислорода при испытаниях;

σ – оценка стандартного отклонения концентрации кислорода, вычисляемая для последних пяти испытаний по формуле:

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(V_i - \text{КИ})^2}{n-1} \right]^{0,5} \quad (3)$$

где: V_i – последовательные значения концентраций кислорода, полученные в последних пяти испытаниях;

$n = 5$ – количество испытаний, ответы из которых приняты при нахождении коэффициента K .

На первом этапе были определены значения КИ для древесины, пропитанной водными растворами отдельных компонентов, входящих в состав ОЗС.

На основании полученных экспериментальных значений КИ были выделены такие концентрации каждого из веществ, которые при разработке

перспективных огнезащитных смесевых композиций были бы оптимальны с точки зрения эффекта антипирирования и стоимости смесового состава: для мочевины, диаммонийфосфата, бишофита, пищевой соды – 200 г/л (20%), для жидкого стекла – 100 г/л (10%).

После этого был определён показатель КИ для образцов древесины, обработанных трёхкомпонентным бинарным составом, включающим в себя жидкое стекло, воду и одно из неорганических соединений – мочевины, диаммонийфосфат, бишофит или пищевую соду. Затем, после испытания образцов, обработанных вышеуказанными составами, на вымываемость, были вновь проведены испытания по определению КИ. Сводная диаграмма с результатами вышеуказанных испытаний представлена на рисунке 1 и в таблице 1.

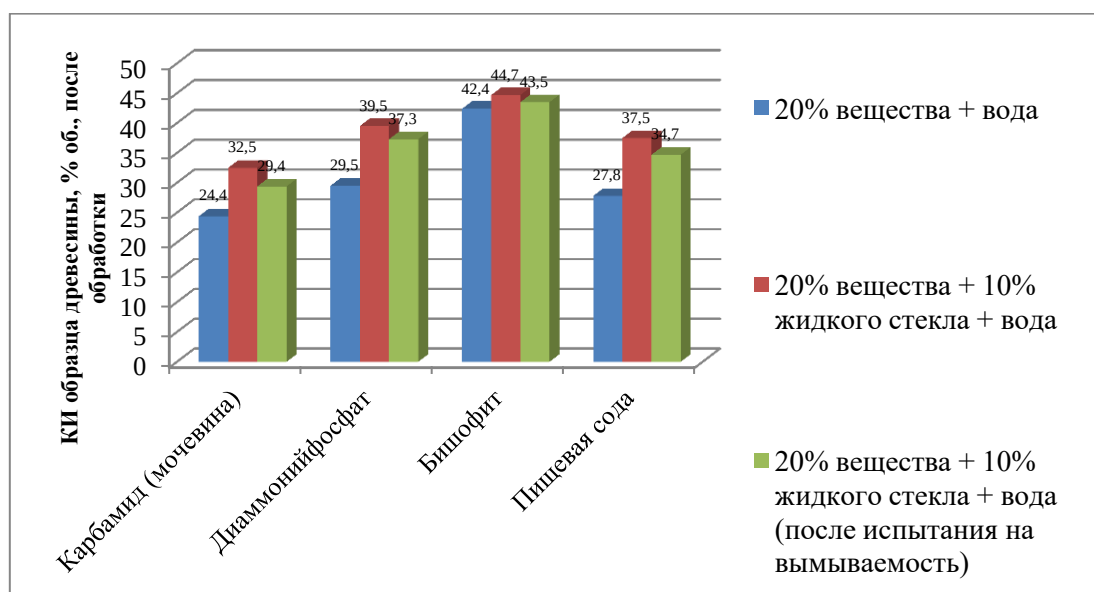


Рисунок 1 – Зависимость показателя КИ древесины от вида ОЗС

Таблица 1 – Значения КИ, определённые согласно ГОСТ Р 12.1.044-89.

Вещество	Карбамид (мочевина)	Диаммоний-фосфат	Бишофит	Пищевая сода
КИ нативных образцов древесины, % об.	18,5			
КИ образцов, обработанных водным раствором вещества, % об.	24,4	29,5	42,4	27,8
КИ образцов, обработанных трёхкомпонентным бинарным ОЗС с жидким стеклом, водой и одним из неорганических соединений, полученные в результате вычислений по ГОСТ 12.1.044-89, % об.	32,5	39,5	44,7	37,5

Продолжение таблицы 1

Вещество	Карбамид (мочевина)	Диаммоний- фосфат	Бишофит	Пищевая сода
КИ образцов, обработанных трёхкомпонентным бинарным ОЗС с жидким стеклом, водой и одним из неорганических соединений, а также подвергшихся испытанию на вымываемость, полученные в результате вычислений по ГОСТ 12.1.044-89, % об.	29,4	37,3	43,5	34,7

Таким образом, на основании оценки КИ образцов древесины, прошедшей обработку ОЗС, можно сделать вывод, что наиболее эффективным из предложенных ОЗС является состав, включающий в себя 20% бишофита, 10% жидкого стекла и воду. КИ пропитанных этим составом образцов составил 44,7% об., что более чем в 2 раза превышает концентрацию кислорода в помещении на момент возникновения потенциального пожара.

В третьей главе **«Математическое моделирование процесса термодеструкции древесины, прошедшей поверхностную огнезащитную пропитку»** излагаются результаты разработки математической модели процесса теплопереноса в системе «источник высокой температуры – слой древесины, пропитанный ОЗС – нативная древесина» для оценки прочности силовых строительных изделий из древесины, обработанных ОЗС, которые при воздействии открытого пламени подвергаются термодеструкции.

При достижении на поверхности обогреваемого материала температуры воспламенения произойдёт обугливание слоя древесины, пропитанного ОЗС, и начнётся послойная термодеструкция нативной древесины. При этом показатели плотности, теплоёмкости и теплопроводности у материала, подвергшегося термодеструкции после пропитки ОЗС и без таковой, будут различаться. Схематично данный процесс изображён на рисунке 2.

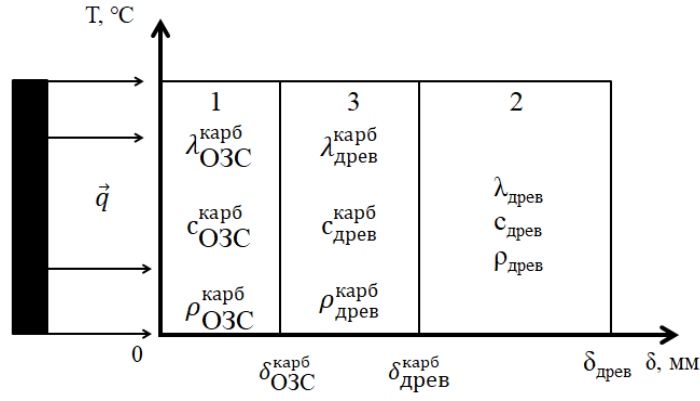


Рисунок 2 – Иллюстрация модели прогрева древесины, прошедшей огнезащитную обработку (1 – обуглившийся слой древесины, пропитанной ОЗС, 2 – нативная древесина, 3 – обуглившийся слой нативной древесины)

Задача теплопереноса в древесине для слоя, прилегающего к участку деревянного изделия, обработанному ОЗС, в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\frac{\partial T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(\bar{\delta}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(\bar{\delta}, Fo)}{\partial \bar{\delta}^2} \quad (Fo > 0, 0 \leq \bar{\delta} \leq K_{\delta}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_{\text{карб}}^{\text{древ}}(\bar{\delta}, Fo)}{\partial (Fo \cdot K_a)} = \frac{\partial^2 T_{\text{карб}}^{\text{древ}}(\bar{\delta}, Fo)}{\partial \bar{\delta}^2} \quad (Fo > 0, K_{\delta} \leq \bar{\delta} \leq 1). \quad (5)$$

Начальные условия:

$$T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(\bar{\delta}, 0) = T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(\bar{\delta}); \quad (6)$$

$$T_{\text{карб}}^{\text{древ}}(\bar{\delta}, 0) = T_{\text{карб}}^{\text{древ}}(\bar{\delta}). \quad (7)$$

Граничные условия:

$$\frac{Ki}{s} = \frac{\partial T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(K_{\delta}, Fo)}{\partial \bar{\delta}}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(0, Fo)}{\partial \bar{\delta}} = K_{\lambda} \frac{\partial T_{\text{карб}}^{\text{древ}}(0, Fo)}{\partial \bar{\delta}}; \quad (9)$$

$$T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(0, Fo) = T_{\text{карб}}^{\text{древ}}(0, Fo); \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}(1, Fo)}{\partial \bar{\delta}} = 0. \quad (11)$$

Для упрощения расчетов в рассмотрение были введены безразмерные переменные:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_{\text{карб}} - \delta_{\text{ОЗС}}}; K_{\delta} = \frac{\delta_{\text{карб}}^{\text{древ}}}{\delta_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}}; K_a = \frac{a_{\text{карб}}^{\text{древ}}}{a_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}}; K_{\lambda} = \frac{\lambda_{\text{карб}}^{\text{древ}}}{\lambda_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}}; \quad (12)$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}^2}}; Ki = \frac{q_{\text{п}} \delta_{\text{карб}}^{\text{ОЗС}}}{\lambda_{\text{карб}} (T_{\text{карб}}^{\text{древ}} - T_0)}. \quad (13)$$

Задача (4) – (11) решалась методом интегрального преобразования Лапласа. Для решения задачи (4) – (11) можно применить следующие выражения:

$$T_1(\bar{\delta}, Fo) = \frac{1}{1+K_a K_\lambda K_\delta} \left\{ 1 - K_\lambda K_\delta - Ki K_\lambda \left[Fo + \frac{(1-\bar{\delta})^2}{2} - \varphi(K_a, K_\lambda, K_\delta) \right] \right\} +$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \psi_1(\mu_n)} \left\{ \mu_n \sin \mu_n [\cos(\mu_n \bar{\delta}) \cos(\mu_n \sqrt{K_a} K_\delta) - \right.$$

$$\left. - \sqrt{K_a} K_\delta \sin(\mu_n \bar{\delta}) \sin(\mu_n \sqrt{K_a} K_\delta) \right] - \frac{K_\lambda}{\sqrt{K_a}} \cos[\mu_n (1 + \delta)] \right\} \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (14)$$

$$T_2(\bar{\delta}, Fo) = \frac{1}{1+K_a K_\lambda K_\delta} \left\{ 1 - K_\lambda K_\delta + Ki(\bar{\delta} - Fo K_a K_\delta) + Ki K_\lambda \left[\varphi(K_a, K_\lambda, K_\delta) - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{1+K_a \bar{\delta}^2}{2} \right] \right\} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_1^*}{\mu_n^2 \psi_1(\mu_n)} \left\{ \mu_n \sin \mu_n \cos[\mu_n \sqrt{K_a} (K_\delta - \bar{\delta})] - \frac{\mu_n}{\sqrt{K_a}} \sin(\mu_n \sqrt{K_a} K_\delta) \times \right.$$

$$\times \left[K_\lambda \cos \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_a} \bar{\delta}) + \frac{1}{\sqrt{K_a}} \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_a} \bar{\delta}) \right] +$$

$$\left. + Ki \left[K_\lambda \cos \mu_n \cos(\mu_n \sqrt{K_a} \bar{\delta}) + \frac{1}{\sqrt{K_a}} \sin \mu_n \sin(\mu_n \sqrt{K_a} \bar{\delta}) \right] \right\} \exp(-\mu_n^2 Fo). \quad (15)$$

Преобразование выражений (14)-(15) позволит вывести уравнение (16), которое будят являться частным случаем решения задачи (4)-(11) для слоя материала, в котором теплофизические параметры фаз будут постоянными.

$$T(\tau, h) = T_0 + (T_{ст} - T_0) \left[1 - 4 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot \cos\left[\frac{(2n-1)\pi}{2} \cdot \frac{h}{r_0}\right] \cdot e^{\left[\frac{-(2n-1)^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{a\tau}{r_0^2}\right]}}{[(2n-1)\pi]} \right]. \quad (16)$$

Результаты расчетов можно изобразить на следующих рисунках. На рисунке 3 изображена схема распределения температур в слое древесины, пропитанном ОЗС, при нагреве наружной поверхности материала до температуры T_1 , которая будет ниже температуры термодеструкции древесины $T_{дестр}$.

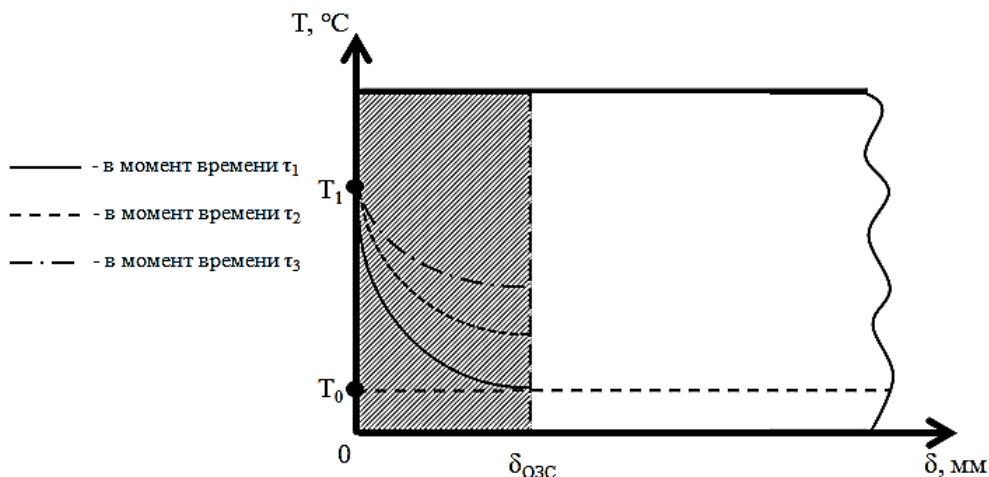


Рисунок 3 – Схема распределения температур в слое древесины, пропитанном, при нагреве наружной поверхности материала до температуры $T_1 < T_{дестр}$

На рисунке 4 приведена схема распределения температур в слое древесины при достижении температуры $T_{\text{дестр}}$ на её наружной поверхности.

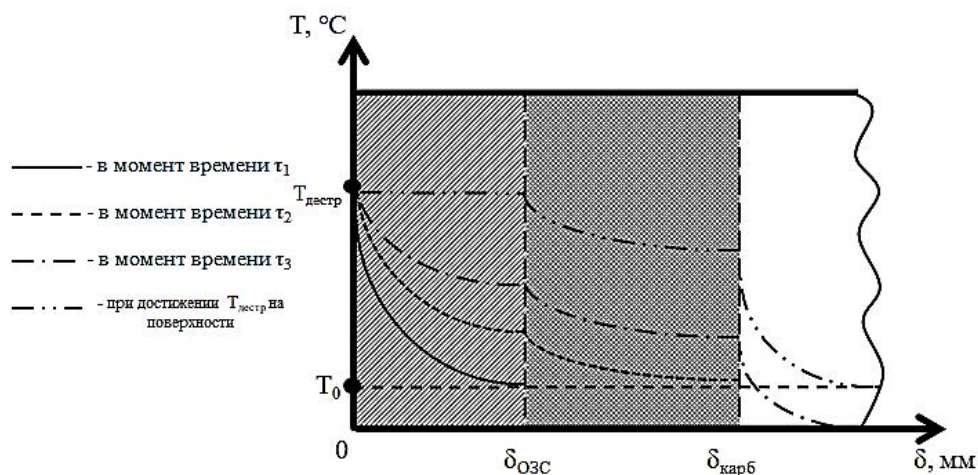


Рисунок 4 – Схема распределения температур в слое древесины, пропитанном ОЗС, при нагреве наружной поверхности материала до температуры $T_{\text{дестр}}$

Стоит отметить, что при температуре поверхности материала, превышающей $T_{\text{дестр}}$, в материале будут протекать те же процессы теплопереноса и разрушения, что изображены на рисунке 4, но при этом скорость протекания данных явлений возрастёт, что выразится в более пологом положении представленных кривых.

Можно утверждать, что использование данной модели позволит спрогнозировать уменьшение сечения деревянного строительного изделия и, как следствие, определить такие пожарно-технические характеристики, как предел огнестойкости конструкции, что в перспективе предоставит специалистам возможность уйти от проведения ряда дорогостоящих и трудоёмких огневых испытаний.

В четвёртой главе **«Исследование древесины, пропитанной огнезащитными средствами, методом инфракрасной спектроскопии»** представлены результаты исследования образцов ОЗС и ОБЗС, применяемых на территории Ивановской области, с помощью ИК-спектроскопии.

Практика показывает, что на территории региона наиболее распространены ОБЗС следующих марок: Сенеж ОГНЕБИО ПРОФ; RAUM-PROFIE; Prosept ОГНЕБИО ПРОФ; НЕОМИД-450; МиГ-09; Фоскон-Кострома-плюс.

Для определения состава вышеуказанных ОБЗС и установления их основных функциональных групп образцы древесины, прошедшие огнезащитную обработку, исследовались методом ИК-спектроскопии. ИК-спектр вещества содержит полосы поглощения, соответствующие колебаниям определенных групп атомов, функциональных групп и молекул, входящих в состав данного вещества, и является специфическим свойством каждого соединения. Также стоит отметить, что под влиянием теплового воздействия происходит термодеструкция материала, и это проявляется в изменении его ИК-спектра.

На рисунке 5 приведен ИК-спектр ОБЗС «RAUM-PROFIE».

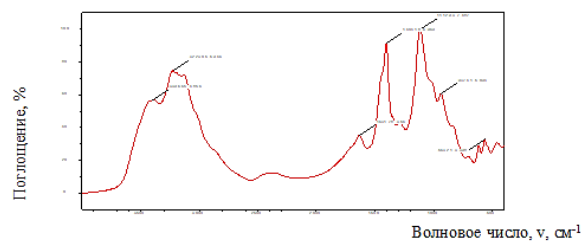


Рисунок 5 – ИК-спектр ОБЗС «RAUM-PROFIE»

На ИК-спектре ОБЗС «RAUM-PROFIE» наблюдаются следующие основные полосы поглощения 3223 см^{-1} , 1401 см^{-1} , 1113 см^{-1} , 925 см^{-1} , 783 см^{-1} , 696 см^{-1} , 619 см^{-1} , 548 см^{-1} и 457 см^{-1} . Полосы поглощения 3143 см^{-1} и 1401 см^{-1} соответствуют валентным и деформационным колебаниям иона аммония NH_4^+ в твердых солях аммония. Полосы поглощения 1113 и 548 см^{-1} , относящиеся к колебаниям ионов H_2PO_4^- и HPO_4^{2-} . ОЗС, содержащие соединения фосфора, имеют полосы поглощения в области $1160\text{--}850\text{ см}^{-1}$, относящиеся к колебаниям ионов H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} и PO_4^{3-} . Такие полосы и наблюдаются на ИК-спектре исследуемого ОБЗС: 925 , 782 , 696 , 619 см^{-1} . Таким образом, исследование методом инфракрасной спектроскопии исследуемого ОЗС позволяет установить их основные функциональные группы и определить тип этих составов. Такая необходимость может возникать в экспертной практике.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено, что с помощью метода ИК-спектроскопии может быть установлен основной компонент ОЗС. В данном случае определено, что в состав «RAUM-PROFIE» входят сложные соли полифосфорных кислот.

Далее таким образом были обработаны и ИК-спектры остальных пяти ОБЗС, которые приведены на рисунках 6-10.

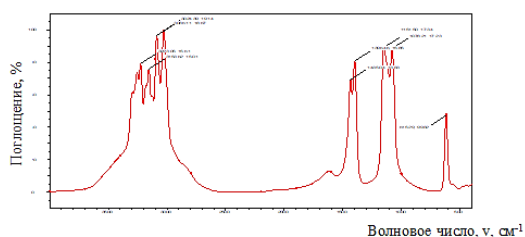


Рисунок 6 – ИК-спектр ОБЗС «МИГ-09»

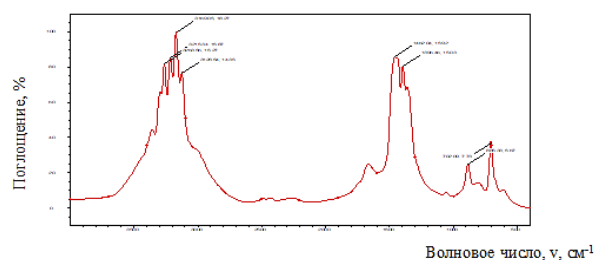


Рисунок 7 – ИК-спектр ОБЗС «СЕНЕЖ ОГНЕБИО ПРОФ»

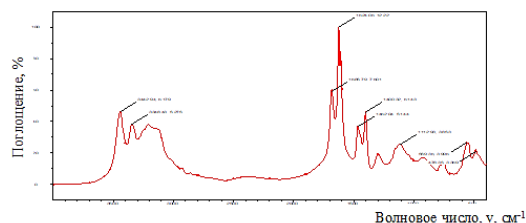


Рисунок 8 – ИК-спектр ОБЗС «Неомид-450»

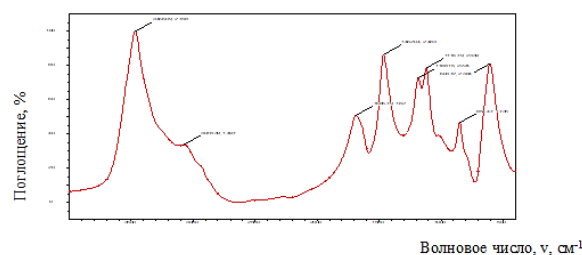
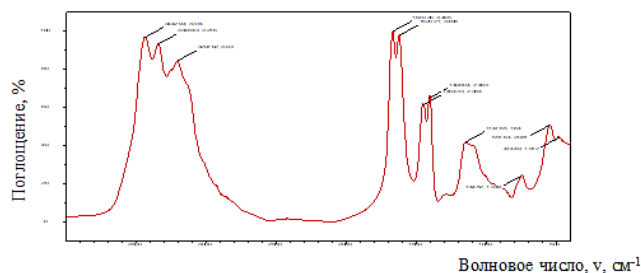


Рисунок 9 – ИК-спектр ОБЗС «Фоскон-Кострома-Плюс»



На рисунках 7, 10 представлены ИК-спектры ОБЗС, содержащих в своем составе соединения с ионом аммония. Спектры имеют полосы поглощения в области $3200\text{--}3450\text{ см}^{-1}$ и $1440\text{--}1460\text{ см}^{-1}$, относящиеся к валентным колебаниям иона NH^{+4} . В то же время ИК-спектры представленных исследуемых ОБЗС имеют полосы поглощения в области $1090\text{--}900\text{ см}^{-1}$ и около 540 см^{-1} , относящиеся к колебаниям ионов H_2PO_4^- и HPO_4^{2-} , которые содержатся в моно- и диаммонийфосфатах, входящих в состав ОБЗС, а также полосы поглощения около 1105 и 613 см^{-1} , относящиеся к колебаниям иона SO_4^{2-} , содержащегося в сернокислом аммонии, который также входит в состав некоторых изучаемых ОБЗС. В спектрах ОБЗС PROSEPT ОГНЕБИО PROF и Неомид-450 наблюдаются полосы поглощения в области $3200\text{--}3450\text{ см}^{-1}$, относящиеся к валентным колебаниям групп NH, и полосы при $1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$, относящиеся к колебаниям амидных групп OCN, которые присутствуют в мочеvine и ее производных.

В пятой главе «**Определение наличия огнезащитных средств на строительных изделиях из древесины**» представлены сведения о методе неразрушающего экспресс-контроля наличия ОЗС на строительных изделиях из древесины, а также результаты апробации данного метода на объектах защиты.

Инструкция по идентификации огнезащиты предполагает подтверждение подлинности конкретной продукции и соответствия ее определенным требованиям, для чего необходимо дорогостоящее оборудование, а также наличие специалистов в области термического анализа, что затрудняет использование данного метода на практике. В связи с этим был предложен альтернативный метод по определению наличия на поверхности средств

огнезащиты, основанный на измерении электрического сопротивления поверхностного слоя древесины, а также устройство, позволяющее применить данный метод.

В случае пропитки деревянных элементов зданий и сооружений огнезащитными составами на поверхности древесины появляются соли, которые приводят к уменьшению сопротивления. Блок-схема устройства для определения электрического сопротивления поверхностного слоя древесины приведена на рисунке 11.

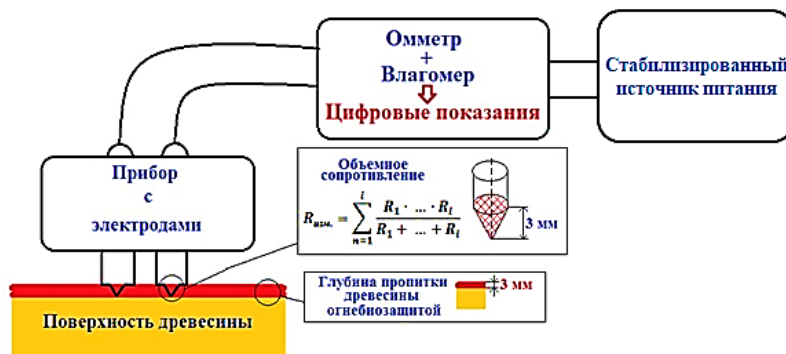


Рисунок 11 – Блок-схема устройства для измерения электрического сопротивления древесины

Прибор имеет компактные размеры, поэтому будет удобен для использования не только в лабораторных условиях, но и непосредственно на объектах. Также необходимо отметить, что данный прибор можно использовать для сравнительного анализа и получения данных по значениям сопротивления на обработанной огнезащитой стороне изделия и необработанной. После конструирования прибора были проведены эксперименты по определению сопротивления на образце до и после огнезащитной обработки.

В данной работе было проведено обследование деревянных строительных изделий на объектах Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (далее – ИПСА ГПС МЧС России), а именно деревянных элементов чердачных помещений общежития факультета пожарной безопасности и учебного корпуса №1. Полученные на объекте защиты результаты сравнивались с показателями сопротивления поверхностного слоя свежееобработанной древесины образца сравнения.

Таблица 2 – Результаты измерений для чердачных конструкций учебного корпуса №1

Место проведения измерений	Значения сопротивления на поверхности деревянного элемента, кОм	Значения сопротивления на поверхности образца сравнения, кОм
Балка	43	42
Колонна	112	20
Стропило	185	18
Укосина	166	14
Обрешётка	170	30

Таблица 3 – Результаты измерений для чердачных конструкций общежития факультета пожарной безопасности

Место проведения измерений	Значения сопротивления на поверхности деревянного элемента, кОм	Значения сопротивления на поверхности образца сравнения, кОм
Балка	170	42
Колонна	147	20
Стропило	161	18
Укосина	150	14
Обрешётка	166	30

Из данных, представленных в таблицах 2-3, видно, что электрическое сопротивление поверхности деревянных изделий и элементов чердачных помещений обследуемых объектов защиты практически во всех случаях в несколько раз превышает аналогичный показатель для поверхности образца сравнения. Если для образца сравнения величина электросопротивления поверхности находится в пределах 14-42 кОм, то почти на всех поверхностях обследуемых элементов чердачных помещений этот показатель превышает величину в 140 кОм. Иными словами, почти во всех случаях сопротивление поверхностного слоя деревянных элементов чердачных помещений почти в 10 раз выше, чем на образце сравнения. Исключения составляют результаты измерений сопротивления на балках и колоннах учебного корпуса №1. На балках данного здания среднее значение сопротивления поверхностного слоя почти равно аналогичному показателю для образца сравнения. На колоннах учебного корпуса №1 зафиксировано среднее значение электросопротивления поверхности деревянных элементов 112 кОм.

На основании проведенных испытаний можно утверждать, что в учебном корпусе №1 и общежитии факультета пожарной безопасности ИПСА ГПС МЧС России наблюдается тенденция к снижению антипиреющего эффекта от нанесения огнезащитных пропиток на поверхность деревянных элементов и изделий чердачных помещений. Можно говорить о необходимости повторной обработки деревянных элементов чердачных помещений на данных объектах защиты огнезащитными пропиточными композициями.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагаемое в данной работе устройство для неразрушающего экспресс-контроля и методика его применения при оценке наличия ОЗС на объектах защиты могут быть использованы на объектах защиты в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что наиболее распространёнными веществами, применяемыми при разработке рецептов огнезащитных средств для поверхностной пропитки древесины, являются такие химические соединения, как жидкое стекло, бишофит, сода, мочевины и диаммонийфосфат.

2. Впервые проведено ранжирование антипиренов по показателям кислородного индекса древесины, прошедшей поверхностную огнезащитную пропитку. Построен ряд антипиренов по пожарной опасности древесины, пропитанной огнезащитными средствами: бишофит ($KI=43,5\pm0,2\%$ об.), диаммонийфосфат ($KI=34,5 \pm 0,2\%$ об.), гидрокарбонат натрия ($KI=32,6\pm0,2\%$ об.), мочеви́на ($KI=28,5\pm0,2\%$ об.).

3. Разработана рецептура огнезащитного композиционного состава, включающего в себя 20% бишофита, 10% жидкого стекла и воду. Кислородный индекс образцов древесины, пропитанных данным составом, составил 44,7% об.

4. Разработана математическая модель, описывающая процесс термодеструкции древесины, пропитанной огнезащитным средством на глубину 1-3 мм, в результате воздействия опасных факторов пожара, а также позволяющая оценить глубину её разрушения в зависимости от времени воздействия высокой температуры. Путём расчётов с использованием полученной математической модели, установлено, что древесина, пропитанная огнезащитным средством на глубину 1-3 мм, за 5 минут обуглится на глубину до 2,5мм, за 10 минут – на глубину до 3,5 мм, за 15 минут – на глубину до 5 мм.

5. Предложен метод экспресс-оценки наличия антипиренов на деревянных строительных изделиях, основанный на измерении электрического сопротивления поверхности древесины. Выявлено, что введение огнезащитных средств в древесину на глубину 1-3 мм снижает электрическое сопротивление поверхностного слоя материала в 8-10 раз.

6. Разработано устройство, позволяющее производить качественную экспресс-оценку наличия огнезащитных средств на строительных изделиях из древесины без отбора проб с поверхности материала. Затраты времени на одно измерение не превышают 5 секунд.

7. Применимость метода и устройства экспресс-контроля наличия огнезащитных средств на поверхности древесины для использования сотрудниками Государственного пожарного надзора МЧС России, работниками страховых служб и собственниками зданий подтверждена испытаниями на эксплуатируемых объектах защиты.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. * **Панев, Н.М.** Проблемы разработки огнезащитных составов для древесины и контроля их наличия / **Н.М. Панев**, А.А. Воронцова, А.Л. Никифоров, С.Н. Животягина // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – №2(23). – С. 7-11.

2. * **Панев, Н.М.** Актуальные вопросы разработки огнезащитных композиций для древесины / **Н.М. Панев**, А.А. Воронцова, В.А. Комельков, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. – 2017. №2. – С. 66-69.

3. * **Панев, Н.М.** Оценка влияния состава огнезащитных обработок на показатель кислородного индекса древесины / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров,

М.В. Винокуров // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2017. – №3(51). – С. 92-96.

4. * Петров, А.В. Исследование влияния силиката натрия на термическое разложение древесины методом термической гравиметрии // А.В. Петров, А.Л. Никифоров, **Н.М. Панев**, С.Н. Ульева, И.Ю. Шарабанова, О.Г. Циркина // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России (Современные проблемы гражданской защиты). – 2018. – №1 (26). – С. 85-90.

5. *Защита деревянных конструкций уникальных объектов от гниения и горения / **Н.М. Панев**, С.Н. Наконечный, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 4(8). – С. 92-99.

6. **Панев, Н.М.** Разработка научно-обоснованных подходов к созданию огнезащитных составов для деревянных строительных конструкций / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, А.А. Воронцова, С.Н. Животягина // Материалы X Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной 25-летию МЧС России. – Иваново. – 2015. – С. 54-57.

7. **Панев, Н.М.** Оптимизация огнезащитного состава для деревянных строительных конструкций / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, С.Н. Животягина, Е.Г. Родионов // Вестник Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. – Иваново. – 2015. – №1(24) – С. 25-28.

8. **Панев, Н.М.** Огнезащитные составы для древесины: проблемы применения и контроля / **Н.М. Панев**, А.А. Александров, А.Л. Никифоров, С.Н. Животягина // Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016». – М., 2016. – С.116-119.

9. Кисляков, О.А. Поиск возможностей создания научно-обоснованной методики создания антипирюющих составов для древесины / О.А. Кисляков, А.А. Воронцова, **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров // Сборник материалов II Межвузовской научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», посвященной Году пожарной охраны России. – Иваново. – 2016. – С. 49-51.

10. **Панев, Н.М.** Актуальные проблемы снижения пожарной опасности строительных конструкций из древесины / **Н.М. Панев**, А.А. Воронцова, А.А. Александров, А.Л. Никифоров, С.Н. Животягина // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК-2016)». – Иваново. – 2016. – С. 102-103.

11. **Панев, Н.М.** Исследование зависимости кислородного индекса образцов древесины от концентрации антипирена / **Н.М. Панев**, А.А. Александров, А.А. Воронцова, Д.В. Калашников, А.Л. Никифоров // сборник материалов XIX Международного научно-практического форума «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2016)». – Иваново. – 2016. – С. 127-131.

12. **Панев, Н.М.** Перспективные вещества для использования в качестве антипиренов для древесины / **Н.М. Панев**, А.А. Александров, А.А. Воронцова,

А.Л. Никифоров, С.Н. Животягина// Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной году Пожарной Охраны России. – Иваново. – 2016. – С. 145-147.

13. Зайцев, Д.В. Влияние состава огнезащитной пропитки на показатель кислородного индекса древесины / Д.В. Зайцев, **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов», посвященной Году гражданской обороны. – Иваново. – 2017. – С. 77-80.

14. **Панев, Н.М.** Подбор компонентов для оптимизации огнезащиты деревянных конструкций / **Н.М. Панев**, Д.В. Зайцев, А.А. Воронцова, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина, С.Н. Животягина// Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК-2017)». – Иваново. – 2017. – С. 86-87.

15. **Панев, Н.М.** Апробация метода оценки наличия огнезащитной обработки деревянных конструкций на объектах ИПСА ГПС МЧС России / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, Е.В. Карасев, А.А. Воронцова // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной году Гражданской обороны России. – Иваново. – 2017. – С. 117-120.

16. Илесхаджиев, Р.И. Применение метода оценки наличия огнезащитной обработки древесины на действующих объектах защиты / Р.И. Илесхаджиев, **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК-2018)». – Иваново. – 2018. – С. 49-51.

17. **Панев, Н.М.** Оптимизация состава огнезащитного пропиточного средства для древесины / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, И.Ю. Шарбанова, О.Г. Циркина // Сборник материалов II Межвузовской научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии». – Иваново. – 2018. – С. 127-133.

18. **Панев, Н.М.** Огнезащитная эффективность индивидуальных антипиренов для древесины и методы определения их наличия / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность», посвященной году культуры безопасности – Иваново. – 2018. – С. 189-193.

19. **Панев, Н.М.** К вопросу об эффективности индивидуальных антипиренов для древесины и контроле их наличия / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина // Сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов (с международным участием) «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК-2019)». – Иваново. – 2019. – С. 100-103.

20. **Панев, Н.М.** Математическое моделирование процесса термического разложения деревянных изделий, прошедших огнезащитную обработку / **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, О.Г. Циркина, С.В. Федосов // Сборник

материалов III Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России. – Иваново – 2019. – С. 150-155.

21. Шабунин, С.А. Применение методов квантовой химии для оценки эффективности антипиренов / С.А. Шабунин, **Н.М. Панев**, А.Л. Никифоров, С.Н. Ульева, М.В. Винокуров // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии», посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России. – Иваново – 2019. – С. 249-251.

*Статьи в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность за ценные замечания при проведении исследований, обсуждении результатов работы, а также при оформлении диссертации:

*академику РААСН, доктору технических наук, профессору
Сергею Викторовичу Федосову*