

Научная статья
УДК 614.841.45
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.18.37.015

Разработка портативного прибора для неразрушающего экспресс-контроля качества огнезащитной обработки деревянных конструкций

Александр Сергеевич Горбунов¹

Николай Владимирович Елфимов

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0002-1971-3436>

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Горбунов, gorbunovgps@mail.ru

Аннотация. Актуальность работы обусловлена отсутствием эффективных средств для оперативного неразрушающего контроля качества огнезащитной обработки деревянных конструкций (далее – ДК) в полевых условиях. Существующие методы, регламентированные действующими стандартами, либо требуют отбора образцов (нарушение целостности конструкции), либо используют открытое пламя, либо являются субъективными. Целью исследования являлась разработка научно обоснованной методологии и создание опытного образца портативного прибора, позволяющего быстро и объективно оценивать наличие и качество огнезащитной пропитки ДК по их колориметрической реакции на стандартизированное термическое воздействие. В работе проведен критический анализ существующих методов контроля, выявлены их системные недостатки. В ходе лабораторных экспериментов установлены количественные зависимости изменения цветовых характеристик (в канале R RGB-модели) для трех основных строительных пород древесины (сосна, ель, лиственница) от температуры кратковременного контактного нагрева (150–250 °С) и факта обработки огнезащитным составом на основе солей бора. На основе выявленных регрессионных зависимостей разработана и апробирована конструкция прибора, интегрирующая блок нагрева с регулятором и цифровой датчик цвета. Статистически подтверждено, что при температуре нагрева 240 °С разница в значениях R между необработанной древесиной и образцами, обработанными в два слоя, превышает 30 единиц для всех исследованных пород, что является надежным диагностическим признаком. Разработаны и представлены детальные методические рекомендации по применению прибора для натурных обследований. Основной вывод статьи заключается в следующем – разработанный прибор и методика позволяют устранить ключевые недостатки существующих подходов, обеспечивая быстрый, безопасный, объективный и неразрушающий контроль, что существенно повышает эффективность государственного пожарного надзора и оценку качества проведения огнезащитных работ.

Ключевые слова: огнезащитная обработка древесины, контроль качества, неразрушающий метод, экспресс-прибор, цветоизмерение, колориметрия, термическое воздействие, пиролиз, антипирены, пожарная безопасность

Для цитирования: Горбунов А.С., Елфимов Н.В. Разработка портативного прибора для неразрушающего экспресс-контроля качества огнезащитной обработки деревянных конструкций // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 201-210. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.18.37.015>.

Original article.

Development of a portable device for non-destructive rapid quality control of fire-resistant treatment of wooden structures

Alexander S. Gorbunov¹

Nikolay V. Elfimov

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

¹<https://orcid.org/0000-0002-1971-3436>

Corresponding author: Alexander S. Gorbunov, gorbunovgps@mail.ru

Abstract. The relevance of the work is due to the lack of effective means for operational non-destructive quality control of fire-resistant treatment of wooden structures (hereinafter referred to as DCS) in the field. Existing methods regulated by current standards either require sampling (violation of structural integrity), or use an open flame, or are subjective. The aim of the study was to develop a scientifically sound methodology and create a prototype portable device that allows for a quick and objective assessment of the availability and quality of flame retardant impregnation based on their colorimetric response to standardized thermal effects. A comprehensive critical analysis of existing control methods has been carried out, and their systemic shortcomings have been identified. In the course of laboratory experiments, quantitative dependences of changes in color characteristics (in the R channel of the RGB model) for three main building wood species (pine, spruce, larch) on the temperature of short-term contact heating (150-250 °C) and the fact of treatment with a flame retardant based on boron salts were established. Based on the revealed regression dependencies, a device design has been developed and tested that integrates a heating unit with a regulator and a digital color sensor. It has been statistically confirmed that at a heating temperature of 240 °C, the difference in R values between untreated wood and samples treated in two layers exceeds 30 units for all the studied rocks, which is a reliable diagnostic sign. Detailed methodological recommendations on the use of the device for field examinations have been developed and presented. The main conclusion of the article is that the developed device and methodology make it possible to eliminate the key shortcomings of existing approaches, providing fast, safe, objective and non-destructive testing, which significantly increases the effectiveness of state fire supervision and the assessment of the quality of fire protection work.

Keywords: fire-resistant wood treatment, quality control, non-destructive method, express device, color measurement, colorimetry, thermal effect, pyrolysis, flame retardants, fire safety

For citation: Gorbunov A.S., Elfimov N.V. Development of a portable device for non-destructive rapid quality control of fire-resistant treatment of wooden structures // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 201-210. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.18.37.015>.

Введение

Древесина, несмотря на появление новых композиционных материалов, сохраняет лидирующие позиции в строительстве и отделке благодаря благоприятному сочетанию прочностных, теплофизических и эстетических свойств. Однако, её высокая горючесть, регламентированная ГОСТ 12.1.044, является главным фактором, ограничивающим применение в конструкциях. Решением данной проблемы является обработка древесины огнезащитными составами (далее – ОС), которые, вступая в сложные физико-химические реакции при нагреве, замедляют воспламенение и распространение пламени [1, 2]. Эффективность такой обработки нормируется (I или II группа по ГОСТ Р 53292) и требует регулярного контроля как после нанесения, так и в процессе эксплуатации [3].

Существующий арсенал методов контроля можно условно разделить на группы:

1. Лабораторные методы (испытания по ГОСТ Р 53292). Являются наиболее точными, но требуют отбора крупных образцов, их доставки в лабораторию и проведения длительных испытаний, что неприменимо для оперативного контроля на объекте. Термический анализ [4] требует сложного дорогостоящего оборудования и подготовки образцов.

2. Полевые методы с отбором проб (например, использование прибора ПМП-1 [5] или «метод стружки»). Прибор ПМП-1, основанный на воздействии пламени газовой горелки на образец стружки, требует нарушения целостности конструкции для отбора пробы. Это приводит к необходимости последующей реставрации покрытия, а сам метод сопряжен с использованием открытого огня, что недопустимо на многих объектах (например, на взрывопожароопасных производствах). «Метод стружки» крайне субъективен и ненадежен.

Таким образом, существует устойчивый разрыв между требованием к оперативности и объективности контроля и реальными возможностями существующих регламентированных методов. Работа [1] предлагала косвенный метод оценки по удельному электросопротивлению обугленного остатка, однако он критически зависит от однородности пропитки, влажности и требует предварительного построения калибровочных графиков для каждого типа ОС.

Перспективным направлением является использование колориметрических методов. Известно, что термическая деструкция древесины, особенно в присутствии химических антипиренов, сопровождается интенсивным изменением её цвета вследствие процессов дегидратации, окисления и карбонизации [6]. Автором ранее было показано, что существует корреляция между степенью термического повреждения и цветовыми координатами обугленной поверхности [7]. Была выдвинута гипотеза, что данный эффект можно использовать для создания количественного метода контроля наличия и качества огнезащитной обработки.

Целью настоящего исследования являлась разработка научных основ, создание и испытание портативного прибора для неразрушающего экспресс-контроля качества огнезащитной обработки древесины, основанного на регистрации колориметрического отклика на локальное термическое воздействие.

Задачи исследования:

1. Установить путем лабораторных экспериментов функциональные зависимости изменения параметра R (красный канал RGB) от температуры контактного нагрева для эталонных образцов древесины (сосна, ель, лиственница) с различным состоянием огнезащитной обработки (необработанные, обработанные в 1 и 2 слоя).

2. Определить оптимальный температурно-временной режим нагрева, обеспечивающий максимальную дифференциацию между обработанными и необработанными образцами.

3. Разработать конструктивную схему и создать опытный образец прибора, обеспечивающий стабильность заданных параметров нагрева и точность цветоизмерения.

4. Разработать и апробировать методику проведения измерений в полевых условиях и алгоритм интерпретации полученных данных.

Объекты и материалы исследования

Для обеспечения репрезентативности результатов были выбраны три наиболее распространенные в строительстве породы древесины, существенно различающиеся по своей структуре и свойствам:

1. Сосна обыкновенная – мягкая хвойная порода, легко пропитываемая, с высокой смолистостью.

2. Ель обыкновенная – мягкая хвойная порода, трудно пропитываемая, с низкой смолистостью и большим количеством сучков.

3. Лиственница сибирская – твердая хвойная порода с высокой плотностью и природной биостойкостью.

Из воздушно-сухого пиломатериала каждой породы (влажность $10\pm 2\%$) были изготовлены 90 образцов-пластин размерами $70\times 40\times 15$ мм. Такие размеры обеспечивали достаточную площадь для контакта с нагревательным элементом и минимизировали краевые эффекты.

В качестве огнезащитного средства был выбран широко распространенный на рынке состав, соответствующий II группе эффективности по ГОСТ Р 53292. Его действующим веществом являются соли бора (бораты), механизм действия которых основан на плавлении с образованием защитной пленки и выделении негорючих газов, разбавляющих пиролизные продукты [8].

Образцы были разделены на три группы:

1. Группа 1 (Контрольная): 30 образцов (по 10 каждой породы) – без обработки.
2. Группа 2: 30 образцов – обработка в 1 слой с расходом ~ 500 г/м².
3. Группа 3: 30 образцов – обработка в 2 слоя с расходом ~ 1000 г/м²

(норма для II группы).

Нанесение состава проводилось кистью в соответствии с инструкцией производителя. Сушка образцов перед испытаниями осуществлялась в течение 72 часов при температуре $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(60\pm 5)\%$.

Методика предварительных исследований

Для верификации гипотезы о смещении температурного порога пиролиза под действием ОС был проведен предварительный эксперимент в муфельной печи LOIP LF 7/13-G1. 42 образца сосны (21 обработанный, 21 необработанный) выдерживались при температурах 180, 200, 220, 240, 260 и 280 °C в течение 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 минут. Проводилась фотофиксация и визуальная оценка изменения цвета и появления обугленного слоя (Рис.1, 2).

Температура, °C	Время, мин						
	10	20	40	60	80	100	120
180							
200							
220							
240							
260							
280							

Рис.1. Таблица с результатами термического воздействия на необработанные образцы древесины

Температура, °С	Время, мин						
	10	20	40	60	80	100	120
180							
200							
220							
240							
260							
280							

Рис.2. Таблица с результатами термического воздействия на образцы древесины, обработанные составом

Методика испытаний с разработанным прибором

Был сконструирован и изготовлен опытный образец прибора, принципиальная схема которого представлена на Рис.3.

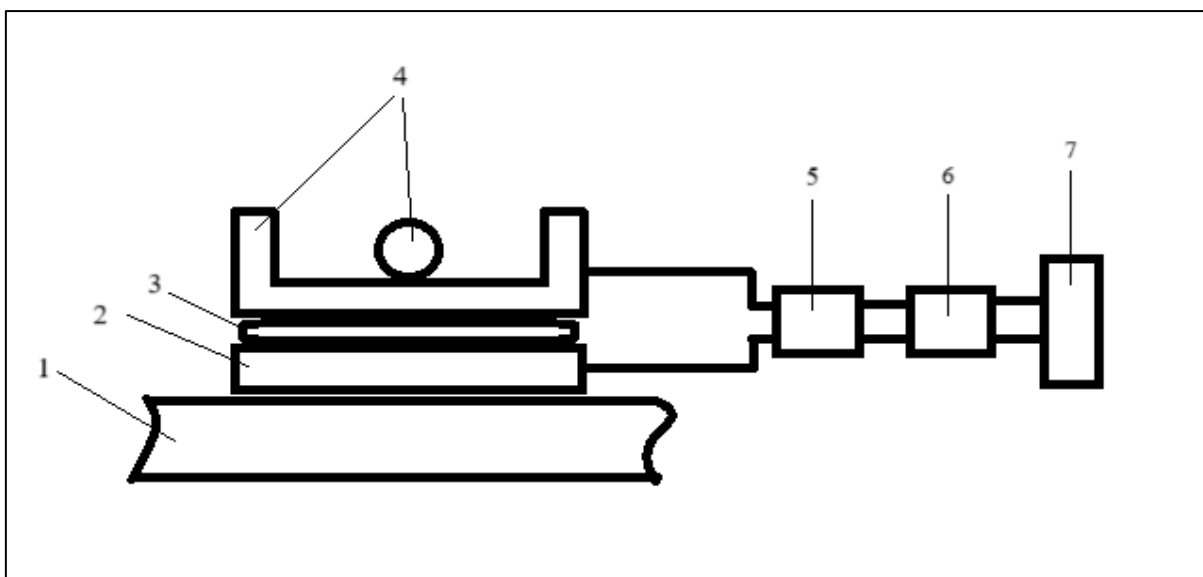


Рис.3. Принципиальная схема разработанного прибора: 1 – испытуемый материал; 2 – нагревательный элемент с термопарой; 3 – термопрокладка; 4 – камера цветоизмерения с датчиком цвета TCS3472; 5 – блок управления на базе микроконтроллера; 6 – ЖК-дисплей для отображения температуры и значения R; 7 – блок питания

Ключевые особенности прибора:

1. Блок нагрева оснащен регулятором, обеспечивающим стабилизацию температуры контактной площадки в диапазоне 50–300 °С с точностью ± 3 °С.

2. Блок цветоизмерения на основе датчика TCS3472 с цифровым выходом I^2C обеспечивает высокую разрешающую способность и стабильность измерений. Для исключения влияния внешней засветки использовалась герметичная камера с отверстием для контакта с образцом [9].

3. Программное обеспечение. Микроконтроллер управляет нагревом, фиксирует температуру, считывает данные с датчика цвета (значения для каналов R, G, B) и выводит результат на дисплей.

Процедура испытания одного образца включала следующие этапы:

1. Калибровка и подготовка. Включение прибора, прогрев до стабильного состояния. Контрольное измерение фонового значения R на холодном участке образца.

2. Термическое воздействие. Установка заданной температуры на блоке управления. После достижения стабильного режима (индикация на дисплее) контактная площадка плотно прижималась к поверхности образца на строго фиксированное время – 30 секунд. Данное время было выбрано эмпирически как достаточное для проявления визуального эффекта, но недостаточное для глубокой карбонизации.

3. Охлаждение и измерение. Образец оставляли для охлаждения в естественных условиях на 2-3 минуты до температуры $\sim 30^\circ\text{C}$.

4. Колориметрический анализ. Камера цветоизмерения плотно прижималась к зоне термического воздействия, и микроконтроллер фиксировал усредненное значение по каналу R (из 10 последовательных измерений).

Испытания проводились для всех 90 образцов при температурах нагрева: 150, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240 и 250 °С. Таким образом, общее количество отдельных измерений составило 900. Статистическая обработка данных (расчет среднего значения, стандартного отклонения, построение доверительных интервалов) проводилась с помощью программного обеспечения.

Результаты и их обсуждение

Результаты предварительных испытаний в муфельной печи.

Визуальный анализ образцов после нагрева в муфельной печи подтвердил основную гипотезу. Необработанная сосна начинала заметно желтеть при 200°С, тогда как обработанная – уже при 180°С. При 240°С и выдержке 60 минут разница становилась максимально контрастной: необработанные образцы имели темно-коричневый цвет, в то время как обработанные – практически черный с характерным блеском коксового остатка. Это согласуется с литературными данными о том, что антипирены на основе бора катализируют реакции дегидратации целлюлозы, приводя к ускоренному образованию углеродного скелета и снижению выхода летучих горючих веществ [8, 10]. Данный режим (240°С) был принят в качестве основного для дальнейших исследований с портативным прибором.

Анализ зависимостей $R = f(T)$.

Результаты измерений с помощью разработанного прибора для всех трех пород древесины представлены в виде сводных графиков на Рис.4-6. Для наглядности приведены усредненные значения по 10 образцам для каждой точки.

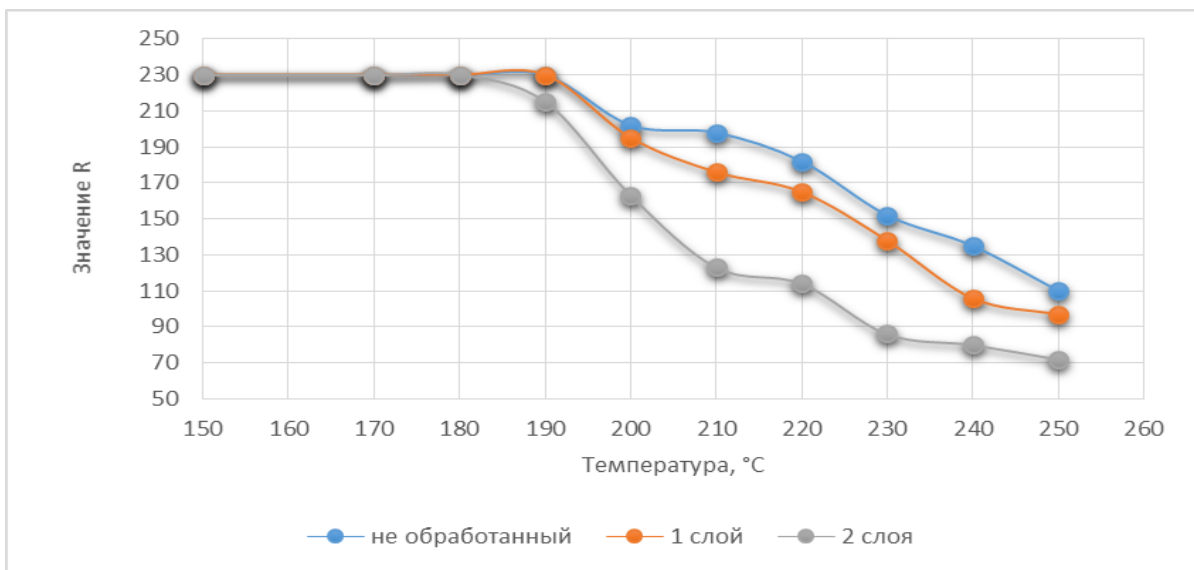


Рис.4. Зависимость значения R от температуры контактного нагрева для древесины сосны

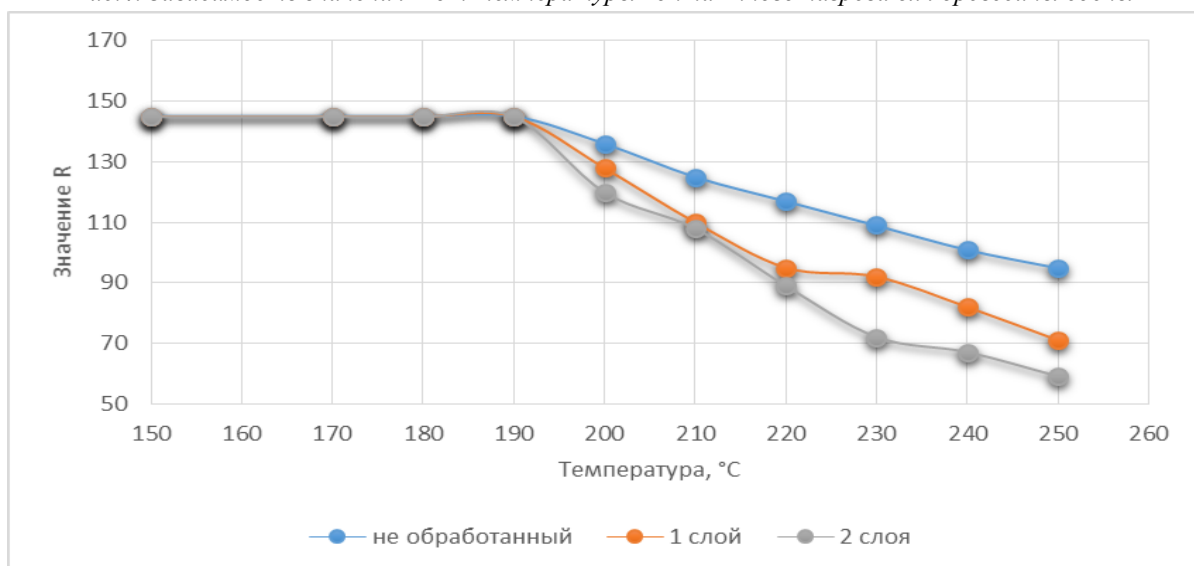


Рис.5. Зависимость значения R от температуры контактного нагрева для древесины лиственницы

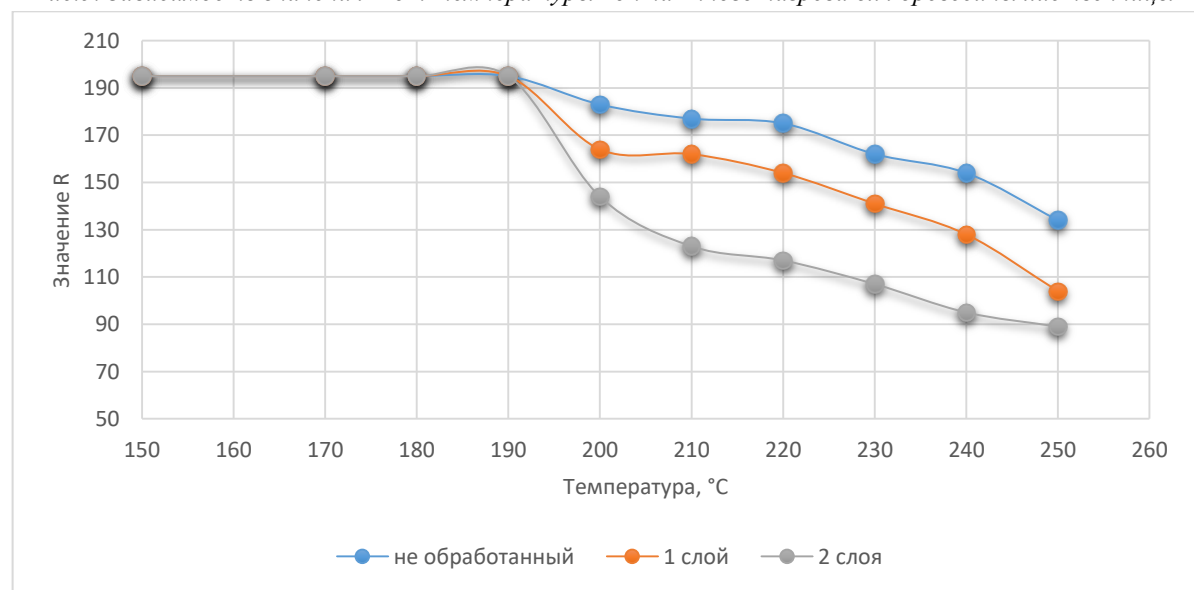


Рис.6. Зависимость значения R от температуры контактного нагрева для древесины ели

Анализ графиков позволяет выявить следующие фундаментальные закономерности:

1. Для всех пород и всех групп образцов наблюдается «плато» в диапазоне 150–190°C, где значение R остается практически постоянным и близким к фону. Это соответствует стадии испарения сорбционной влаги и началу деструкции гемицеллюлоз, не сопровождающейся сильным потемнением. Активное падение значения R (интенсивное потемнение) начинается в интервале 190–210°C.

2. Во всем диапазоне активной термодеструкции (выше 190°C) значения R для обработанных образцов статистически значимо (по критерию Стьюдента) ниже, чем для необработанных. Это количественно подтверждает визуальные наблюдения – обработанная древесина темнеет сильнее.

3. Образцы, обработанные в 2 слоя, демонстрируют более низкие значения R по сравнению с образцами, обработанными в 1 слой. Это указывает на то, что метод чувствителен не только к факту обработки, но и к ее интенсивности (расходу состава).

4. Абсолютные значения R различаются для разных пород из-за разной исходной окраски и плотности. Однако, критически важным является тот факт, что для всех пород при температуре 240°C наблюдается максимальный разрыв между кривыми. Разница ΔR между необработанным образцом и образцом с 2 слоями ОС составляет:

- Для сосны: $\Delta R = 135 - 80 = 55$ ед.
- Для лиственницы: $\Delta R = 101 - 67 = 34$ ед.
- Для ели: $\Delta R = 154 - 95 = 59$ ед.

Таким образом, выбранный режим 240°C является универсальным и обеспечивает надежную дифференциацию. Разница более чем в 30 единиц является ярко выраженным диагностическим признаком наличия обработки.

Обсуждение физико-химических основ метода

Интенсивное потемнение обработанной древесины объясняется механизмом действия борсодержащих антипиренов. При нагреве до 200-250°C борная кислота и бура, входящие в состав ОС, плавятся, обволакивая волокна древесины, и катализируют реакции внутримолекулярной дегидратации целлюлозы. Это приводит к резкому увеличению выхода углеродистого остатка (кокса) и снижению образования левоглюкозана – основного предшественника горючих летучих продуктов. Образующийся кокс имеет более темный цвет и более плотную структуру, чем пиролитический уголь, образующийся при медленном пиролизе необработанной древесины. Следовательно, регистрируемое датчиком резкое падение значения R является прямым следствием ускорения карбонизации и изменения химизма пиролиза под действием антипирена.

Заключение

Проведенный критический анализ подтвердил наличие значительных недостатков у регламентированных методов контроля качества огнезащитной обработки древесины, главными из которых являются разрушающий характер, пожарная опасность и субъективность.

В результате комплекса лабораторных экспериментов впервые установлены и количественно описаны зависимости изменения колориметрического параметра R от температуры локального нагрева для древесины сосны, ели и лиственницы с различной степенью огнезащитной обработки. Статистически доказано, что при температуре 240°C и времени воздействия 30 секунд разница в значениях R между необработанной древесиной и древесиной, обработанной ОС в 2 слоя, превышает 30 единиц, что является объективным и воспроизводимым диагностическим критерием.

Разработана и реализована в виде опытного образца конструкция портативного прибора, обеспечивающего высокую стабильность параметров нагрева и точность цветоизмерения. Прибор исключает необходимость отбора проб и использования открытого огня.

Разработана детальная пошаговая методика применения прибора в полевых условиях, включающая правила выбора точек контроля, процедуру проведения измерений и алгоритм интерпретации результатов на основе сравнения с установленными эталонными зависимостями.

Перспективы дальнейших исследований связаны с:

1. Расширением базы эталонных данных для других типов огнезащитных составов (фосфорсодержащих, азотсодержащих) и пород древесины.
2. Модернизацией прототипа: миниатюризацией, внедрением аккумуляторного питания, разработкой мобильного приложения для автоматической обработки данных и формирования протокола.
3. Проведением межлабораторных сравнительных испытаний для валидации метода и его последующего включения в нормативную документацию.

Предложенное решение позволяет перевести контроль качества огнезащитной обработки древесины из области качественных визуальных оценок в область точных количественных измерений, что будет способствовать значительному повышению уровня пожарной безопасности зданий и сооружений.

Список источников

1. Панев Н.М. Анализ применения огнезащитных композиций для древесины, и разработка методов контроля их наличия: дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук. – 2020.
2. Трушкин Д.В., Корольченко О.Н., Бельцова Т.Г. Горючесть древесины, обработанной огнезащитными составами // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17. – №. 1. – С. 29-33.
3. ГОСТ Р 53292-2009 Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний // Интернет и Право сайт. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/48116/>.
4. Альменбаев М.М. и др. Термический анализ древесины различного срока эксплуатации с огнезащитными составами // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – №. 3. – С. 22-32.
5. Баженов С.В., Лашкин С.М., Наумов Ю.В. Контроль качества огнезащитной обработки древесины с использованием малогабаритного прибора ПМП-1 // Пожарная безопасность. – 2007. – №. 2. – С. 67-71.
6. Горбунов, А. С. Применение метода колориметрии в области пожарной безопасности / А.С. Горбунов // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2024. – № 13. – С. 11-17. – EDN GHGUBD.
7. Горбунов, А.С. Контроль степени термических повреждений древесины путем измерения цветовых характеристик / А.С. Горбунов, М.В. Елфимова, Ю.Н. Безбородов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 131-138. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138.
8. Принцева М.Ю., Клаптюк И.В., Чешко И.Д. Экспертное исследование антипирированной древесины и ее обгоревших остатков. – 2019.
9. Горбунов, А.С. Разработка метода и прибора контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Горбунов Александр Сергеевич, 2023. – 187 с.
10. Берлин А.А., Сивенков А.Б., Хасанова Г.Ш. Химические основы снижения пожарной опасности материалов на основе целлюлозы // Горение и плазмохимия. – 2021. – Т. 19. – №. 2. – С. 65-77.

References

1. Panev N.M. Analysis of the use of flame-retardant compositions for wood, and the development of methods for controlling their presence: dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences – 2020.

2. Trushkin D.V., Korolchenko O.N., Beltsova T.G. Combustibility of wood treated with flame retardants //Fire and explosion safety. - 2008. – Vol. 17. – No. 1. – pp. 29-33.
3. GOST R 53292-2009 Flame retardants and substances for wood and materials based on it. General requirements. Test methods // The Internet and the Law website. — URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/48116/>.
4. Almenbaev M.M. et al. Thermal analysis of wood of various service life with flame retardants //Technosphere security technologies. 2016. No. 3. pp. 22-32.
5. Bazhenov S.V., Lashkin S.M., Naumov Yu.V. Quality control of fire-resistant wood treatment using a small-sized device PMP-1 //Fire safety. - 2007. – No. 2. – pp. 67-71.
6. Gorbunov, A.S. Application of the colorimetry method in the field of fire safety / A. S. Gorbunov // Problems of technosphere safety: proceedings of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists. – 2024. – No. 13. – pp. 11-17. – EDN GHGUBD.
7. Gorbunov, A.S. Control of the degree of thermal damage to wood by measuring color characteristics / A.S. Gorbunov, M. V. Elfimova, Yu. N. Bezborodov // News of higher educational institutions. Instrument engineering. – 2023. – Vol. 66, No. 2. – pp. 131-138. – DOI 10.17586/0021-3454-2023-66-2-131-138.
8. Printseva M.Yu., Klapyuk I.V., Cheshko I.D. Expert study of flame retardant wood and its burnt remains. – 2019.
9. Gorbunov, A.S. Development of a method and device for monitoring the degree of thermal damage to materials at the site of a fire: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Gorbunov Alexander Sergeevich, 2023. – 187 p.
10. Berlin A.A., Sivenkov A.B., Khasanova G.Sh. Chemical bases of reducing the fire hazard of cellulose-based materials //Gorenje and plasmochemistry. – 2021. – Vol. 19. – No. 2. – pp. 65-77.

Информация об авторах

А.С. Горбунов - кандидат технических наук

Н.В. Елфимов - кандидат технических наук

Information about the author

A.S. Gorbunov - Ph.D. of Engineering Sciences

N.V. Elfimov - Ph.D. of Engineering Sciences

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

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

Статья поступила в редакцию 01.10.2025, одобрена после рецензирования 01.12.2025, принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 01.10.2025, approved after reviewing 01.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.