

Исследование влияния продолжительности пропитки огнезащитным составом на огнестойкость древесины

М.Н. Тухбатулин^a, А.Е. Шкуро^b, Т.В. Якубова^c

^{a, c} Уральский институт ГПС МЧС России, улица Мира, д. 22, Екатеринбург, Россия

^b Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт 37, Екатеринбург, Россия

^a tuchbatulin93@mail.ru, ^b shkuroae@m.usfeu.ru, ^c tatanaakubova71723@gmail.com.

^a <https://orcid.org/0009-0004-4586-1143>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>, ^c <https://orcid.org/0009-0006-1880-8368>.

Статья поступила 16.06.2025, принята 02.09.2025

Древесина, несмотря на экологичность и доступность, требует повышения огнестойкости для безопасного использования в строительстве. В статье исследована зависимость огнезащитных свойств древесины от продолжительности её пропитки раствором однозамещённого фосфата аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) – эффективного антипирена, который при нагревании образует защитный слой и ингибирует горение. Стандартные образцы древесины пропитывались 20%-ным раствором антипирена в интервалах от 10 минут до 24 часов, после чего сушились и тестировались на огнестойкость по ГОСТ Р 57270-2016. Установлено, что глубина пропитки линейно зависит от времени экспонирования, но полного насыщения в изученном диапазоне не достигнуто. Сушка до стабильной массы заняла 150 часов, причём масса пропитанных образцов после сушки снизилась, что объясняется кристаллизацией антипирена в капиллярах. Огнестойкость демонстрирует экстремальную зависимость от времени пропитки (описана полиномом второй степени). Это связано с неоднородностью структуры древесины, приводящей к неравномерному распределению антипирена. Даже кратковременная пропитка снижает потерю массы при горении на 32,5 % по сравнению с необработанными образцами. Продолжительная обработка (24 часа) приближает показатели к требованиям I группы огнезащиты (ГОСТ 53292-2009). Результаты подтверждают перспективность фосфата аммония, но указывают на необходимость оптимизации времени пропитки с учётом структурных особенностей древесины. Для достижения равномерного распределения антипирена рекомендовано расширить временные интервалы и изучить влияние плотности слоёв на диффузию раствора. Работа формирует основу для разработки технологий, повышающих огнестойкость деревянных конструкций при минимальных производственных затратах.

Ключевые слова: древесина; огнезащита; антипирены; пропиточный раствор; время пропитки; огнезащитный состав.

Study of the influence of duration of impregnation with fire-retardant composition on fire resistance of wood

M.N. Tukhbatulin^a, A.E. Shkuro^b, T.V. Yakubova^c

^{a, c} Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia; 22, Mira St., Ekaterinburg, Russia

^b Ural State Forest Engineering University; 37, Siberian Tract, Ekaterinburg, Russia

^a tuchbatulin93@mail.ru, ^b shkuroae@m.usfeu.ru, ^c tatanaakubova71723@gmail.com.

^a <https://orcid.org/0009-0004-4586-1143>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>, ^c <https://orcid.org/0009-0006-1880-8368>,

Received 16.06.2025, accepted 02.09.2025

Despite being environmentally friendly and affordable, wood requires increased fire resistance for safe use in construction. The article studies the dependence of fire-protective properties of wood on the duration of its impregnation with a solution of mono-ammonium phosphate ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), an effective fire retardant that forms a protective layer and inhibits combustion when heated. Standard wood samples are impregnated with a 20% fire retardant solution for intervals from 10 minutes to 24 hours, then dried and tested for fire resistance according to GOST R 57270-2016. It is found that the impregnation depth linearly depends on the exposure time, but full saturation in the studied range is not achieved. Drying to a stable mass takes 150 hours, and the mass of the impregnated samples after drying decrease, which is explained by the crystallization of the fire retardant in the capillaries. Fire resistance demonstrates an extreme dependence on the impregnation time (described by a second-degree polynomial). This is due to the heterogeneity of the wood structure, leading to an uneven distribution of the fire retardant. Even short-term impregnation reduces the mass loss during combustion by 32.5% compared to untreated samples. Long-term treatment (24 hours) brings the indicators closer to the requirements of group I fire protection (GOST 53292-2009). The results confirm the prospects of ammonium phosphate, but indicate the need to optimize the impregnation time taking into account the structural features of wood. To achieve a uniform distribution of the fire retardant, it is recommended to extend the time intervals and study the effect of layer density on solution diffusion. The work forms the basis for the development of technologies that increase the fire resistance of wooden structures at minimal production costs.

Keywords: wood; fire protection; fire retardants; impregnating solution; impregnation time, fire retardant composition.

Введение. Древесина, как широко используемый строительный материал, обладает рядом преимуществ, включая экологичность, доступность и высокие механические свойства. Однако её высокая горючесть тре-

бует применения эффективных огнезащитных средств, среди которых наиболее распространённым методом является пропитка растворами антипиренов [1–4].

Ключевым фактором, определяющим эффективность огнезащитной обработки древесины, является интенсивность пропитки, отражающая степень проникновения и распределение антипиренов в её структуре. Необходимость контроля этого показателя обусловлена следующими причинами [3–5]:

1. Обеспечение огнестойкости: глубина и равномерность пропитки непосредственно определяют способность материала противостоять воспламенению и распространению пламени.

2. Соблюдение нормативных требований: стандарты предписывают минимальные допустимые уровни пропитки для разных условий эксплуатации.

3. Оптимизация технологии обработки: установление взаимосвязей между интенсивностью пропитки, временем выдержки, концентрацией раствора и способом обработки способствует повышению экономической эффективности производства.

4. Долговечность защиты: качественная пропитка предотвращает вымывание или разрушение антипиренов под воздействием внешних факторов, продлевая срок службы обработанной древесины.

Антипирены, используемые для защиты древесины от возгорания, классифицируются по нескольким критериям: механизму действия, химическому составу, способу нанесения и другим характеристикам. Основные группы приведены ниже [5–11].

По механизму действия выделяют:

– Солевые антипирены, которые содержат соли борной, кремниевой или ортофосфорной кислот (бораты, силикаты, фосфаты). При нагревании плавятся, образуя защитную пленку, или выделяют кристаллизационную воду, охлаждая материал. Примеры: фосфорнокислый аммоний, серноокислый аммоний.

– Бессолевые (газообразующие) При нагревании разлагаются с выделением негорючих газов (углекислый газ, аммиак), которые вытесняют кислород и замедляют горение. Бессолевые антипирены представлены соединениями, имеющими высокую молекулярную массу и способные формировать стабильные защитные слои на поверхностях материалов. Они обладают меньшей миграционной способностью и обеспечивают долговременную защиту от возгорания. Основные типы бессолевых антипиренов:

- полифосфаты меламин;
- оксиборуглеродистые смолы;
- фенолоформальдегидные олигомеры;
- эфиры алканфосфоновых кислот.

– Реагентные антипирены химически взаимодействуют с целлюлозой древесины, образуя трудновоспламеняемые соединения.

По химическому составу антипирены делятся на:

– Неорганические, включающие гидроксиды алюминия и магния, полифосфат аммония, бораты. Они обладают дымоподавляющими свойствами и характеризуются высокой экологической безопасностью.

– Органические, содержащие меламин, пентаэритритол, фосфорорганические соединения. Такие анти-

пирены эффективны при высоких температурах и используются в терморасширяющихся красках.

По группе обеспечиваемой огнезащитной эффективности антипирены делятся на:

– Антипирены I группы: обеспечивают перевод древесины в трудносгораемое состояние (потеря массы при испытаниях на огнестойкость $\leq 9\%$). Рекомендованы для жилых домов и зон повышенной пожароопасности. Примеры: пропитки на основе бора.

– Антипирены II группы: при пропитке ими древесина становится трудновоспламеняемой (потеря массы $\leq 25\%$). Используются преимущественно для нежилых помещений и временных конструкций.

По типу растворителя и стойкости выделяют:

– Водорастворимые антипирены. Такие антипирены преимущественно безопасны для здоровья, но требуют защиты от влаги. Они в свою очередь делятся на:

- легковымываемые;
- вымываемые;
- трудновымываемые;
- невымываемые.

– Органорастворимые антипирены, которые содержат горючие органические растворители, как правило являются токсичными и применяются в промышленных условиях.

По способу нанесения выделяют:

– Поверхностные пропитки. Они наносятся кистью, валиком или краскопультом. Защищают только наружный слой материала. К пропиткам поверхностного действия относятся грунтовки, лаки и краски.

– Глубокие пропитки. Обработка такими пропитками проводится в автоклавах под большим давлением или подразумевает многократное нанесение. Обеспечивают проникновение антипирена вглубь структуры материала.

Отдельным классом пропиточных растворов можно выделить комбинированные составы, которые включают:

– Огнебиозащитные пропитки, сочетающие в себе антипирены с антисептиками для одновременной защиты древесины от огня, плесени и насекомых [12].

– Универсальные покрытия, включающие вспучивающиеся краски, которые при нагревании образуют теплоизоляционный слой.

На сегодняшний день широкое распространение получили пропиточные растворы на основе фосфатов аммония. Они широко применяются в строительстве, ремонте, изготовлении мебели, оборудовании складов, сельском хозяйстве и туристическом секторе для повышения огнестойкости древесины. Эти растворы улучшают эксплуатационные характеристики деревянных конструкций, делая их менее уязвимыми к возгоранию. Ими пропитывают перекрытия, полы, двери, мебель, сельскохозяйственные постройки, железнодорожные шпалы и лесоматериалы, предназначенные для строительства мостов и путевых сооружений [13]. Важными преимуществами таких растворов являются простота приготовления и нанесения, глубокое проникновение в древесину, обеспечение длительной защиты. Кроме того, фосфаты аммония нетоксичны и безопасны для здоровья человека и животных.

Однозамещенный фосфат аммония действует как эффективный антипирен, повышающий огнестойкость различных материалов, таких как древесина, ткани и полимеры. Он повышает термостабильность обработанного материала, увеличивая температуру начала активного разложения и способствует сохранению материалом структуры и функциональности. Его огнезащитное действие обусловлено несколькими ключевыми механизмами. Так при нагревании однозамещенный фосфат аммония разлагается на аммиак, воду и фосфорную кислоту [14–16]:



Выделяющаяся фосфорная кислота образует на поверхности материала защитный слой, ограничивающий доступ кислорода и снижающий распространение пламени. Выделяемая вода и аммиак способствуют снижению температуры материала, предупреждая его воспламенение и подавляя процессы пиролиза. Аммиак уменьшает концентрацию кислорода в зоне горения, а выделяющаяся вода, испаряясь, охлаждает поверхность. Фосфорная кислота вступает в реакцию с органическими компонентами, формируя углеродистую оболочку («чару»), которая защищает нижележащие слои материала от последующего повреждения огнем.

Совокупность физических (охлаждение, изоляция), химических (ингибирование окислительных реакций) и структурных механизмов (формирование углеродистого слоя) делает однозамещенный фосфат аммония высокоэффективным средством защиты от огня. Однако важно помнить, что эффективность пропитки зависит не только от типа антипирена, но и от правильного подбора концентрации раствора, условий эксплуатации материала и технологических режимов пропитки. Одним из ключевых параметров процесса пропитки является его продолжительность [16–18].

Оптимальная продолжительность пропитки древесины огнезащитными составами важна для улучшения огнестойких свойств материала. Она обеспечивает глубокое проникновение состава, улучшая сопротивление распространению пламени и разрушению древесины при пожаре. Правильно выбранное время пропитки сокращает производственные расходы, исключая перерасход рабочих ресурсов и энергии. Это также предотвращает накопление лишней влаги, увеличение веса и снижение прочностных характеристик древесины.

Нормативы строительства и отделки требуют соответствия конкретных показателей огнестойкости, что обеспечивается правильной продолжительностью пропитки. Она также влияет на экологичность продукта, снижая возможное содержание вредных веществ и поддерживая высокое качество готовых изделий. Следовательно, оптимальный режим пропитки необходим для эффективного производства, соблюдения стандартов и экологической безопасности.

Цель данной работы состоит в изучении зависимости уровня огнестойкости древесины от продолжительности её пропитки огнезащитным составом на основе однозамещенного фосфата аммония. Работа направлена на выявление оптимальных временных режимов обработки, позволяющих обеспечить максимальную противопожарную защиту древесины.

Экспериментальная часть. В качестве модельного огнезащитного состава был использован раствор однозамещенного фосфата аммония (ГОСТ 3772-74) с массовой концентрацией 20 %.

Огнезащитным раствором были пропитаны предварительно высушенные до постоянной массы образцы древесины сосны размерами 85×40×20 (рис. 1). Образцы помещались в пропиточную ванну и экспонировались в растворе в течение 10, 60, 120, 240, 480 и 1440 минут. После извлечения из раствора лишняя влага удалялась с поверхности образцов с помощью хлопчатобумажной ткани. Затем образцы взвешивались на технических весах. После этого образцы высушивались при комнатной температуре в течение 7 суток. В процессе сушки проводилось определение массы образцов.

Для определения влияния времени пропитки на эффективность, оказываемого ей огнезащитного действия проводилось испытание на установке «огневая труба» (рис. 2) по ГОСТ Р 57270-2016. Сущность метода заключается в определении показателя потери массы после прямого воздействия пламени. Изменение массы (P , %) образцов древесины после проведения испытаний определяли по формуле

$$P = \frac{(m_1 - m_2)100}{m_{1i}}$$

где m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г; Полученные результаты округляли до 0,1 %



Рис. 1. Образцы древесины после испытаний



Рис. 2. Установка для определения огнестойкости образцов древесины ОТ-1

Анализ результатов. В результате исследования установлена зависимость (рис. 3) между временем экспонирования в растворе фосфата аммония и глубиной пропитки образца древесины. Экспериментальные данные с высокой точностью могут быть описаны линейным уравнением регрессии ($R^2 > 0,95$). Таким образом, в пределах изученного диапазона продолжительности пропитки полное насыщение образцов древесины огнезащитным составом не произошло. Следовательно, для дальнейшей оптимизации режимов пропитки необходимо провести исследования с большими интервалами продолжительности экспонирования образцов в растворе.

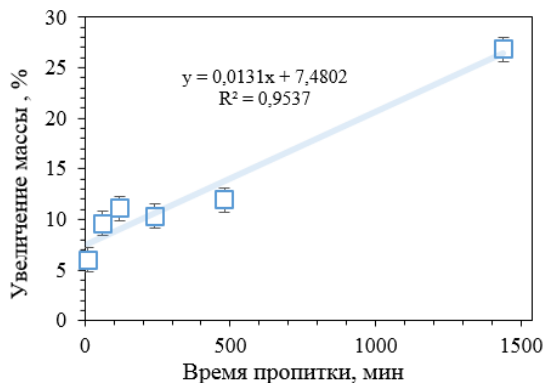


Рис. 3. Зависимость массы образца древесины от времени экспонирования в пропиточном растворе

Динамика изменения массы образцов, пропитанных огнезащитным раствором, в процессе сушки представлена на рис. 4. Все исследуемые образцы достигли постоянной массы при выдержке при комнатной температуре в течение 150 часов.

Масса образцов древесины, выдержанных в пропиточном растворе в течение 10, 60, 120, 240 и 480 минут, масса после сушки была ниже, чем масса образцов до пропитки, что можно объяснить улучшением диффу-

зионных свойств древесины, вследствие кристаллизации фосфата аммония в её капиллярах, и изменении их морфологии: соли образуют кристаллы внутри капилляров, увеличиваясь в объёме и создавая механическое давление на стенки. Давление кристаллов приводит к расширению, микротрещинам или разрыву стенок капилляров.

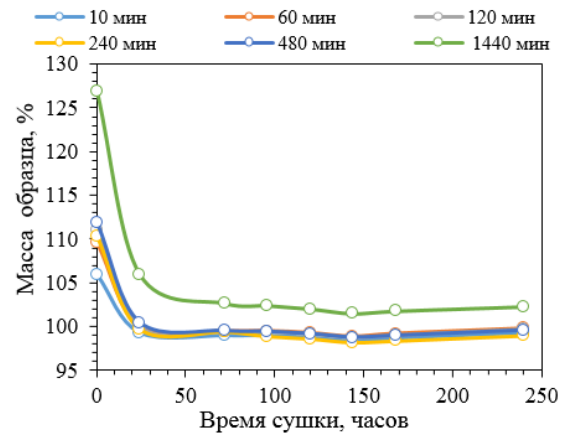


Рис. 4. Динамика изменения массы образцов, пропитанных огнезащитным раствором, в процессе сушки (за 100 % принята масса образца до пропитки)

Зависимость показателя потери массы после испытаний на огнестойкость от времени пропитки образца древесины раствором однозамещенного фосфата аммония показана на рис. 5. Данная зависимость имеет выраженный экстремальный характер и с высокой точностью может быть описана уравнением регрессии в виде полинома второй степени ($R^2 > 0,99$). Экстремальный характер данной зависимости может являться следствием неравномерного распределения антипирена в древесину вследствие её неоднородности. Древесина имеет сложную волокнистую структуру, состоящую из нескольких слоев, каждый из которых обладает раз-

личной плотностью и степенью сопротивляемости проникновению растворов. Кроме того, из-за увеличения внутренней поверхности капилляров, вследствие кристаллизации фосфата аммония, увеличивается степень насыщения поверхности древесины кислородом и площадь контакта с пламенем. Поэтому при небольших объемах поглощенного антипирена эффективность его действия может быть нивелирована. Полноценная защита обеспечивается только тогда, когда антипирен проникает равномерно сквозь все слои. Кратковременная пропитка может оставить значительные участки древесины недостаточно защищенными. При этом следует отметить, что даже кратковременная пропитка раствором однозамещенного фосфата аммония существенно повышает огнестойкость древесины по сравнению с необработанным образцом (потеря массы после испытаний на огнестойкость 32,5 %).

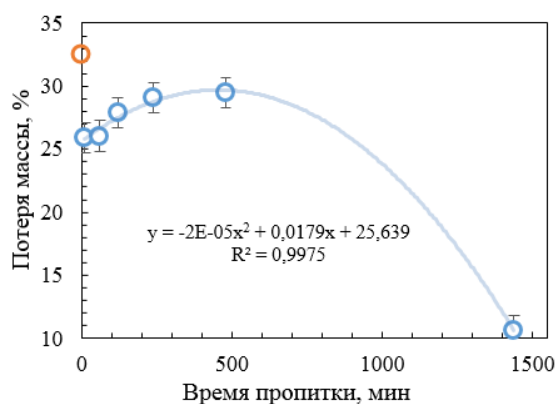


Рис. 5. Зависимость показателя потери массы после испытаний на огнестойкость от времени пропитки образца древесины огнезащитным составом

В результате длительного процесса пропитки древесины (более 24 часов) раствором однозамещенного фосфата аммония наблюдается значительное повышение её огнезащитных характеристик, приближающихся

к параметрам, соответствующим первой группе огнезащитной эффективности (по ГОСТ 53292-2009). Поскольку полное насыщение образца раствором не было достигнуто в рамках проведенного эксперимента, можно сделать вывод о потенциальном увеличении степени огнестойкости древесины при увеличении продолжительности экспозиции в растворе. Это предполагает возможность существенного снижения горючести обработанных образцов при более длительном времени выдержки в растворе.

Заключение. Результаты работы подтверждают перспективность использования фосфата аммония в качестве огнезащитного состава, но требуют учёта структурных особенностей материала при разработке технологий обработки. Проведённое исследование позволило установить ключевые закономерности процесса пропитки древесины раствором фосфата аммония и её влияния на огнестойкость. Установлены следующие закономерности:

1. Зависимость глубины пропитки от времени экспонирования носит линейный характер, однако полное насыщение образцов в изученном диапазоне времени не достигнуто.

2. Динамика сушки образцов показала, что стабилизация массы происходит через 150 часов при комнатной температуре. Снижение массы после сушки по сравнению с исходной предположительно связано с кристаллизацией антипирена в капиллярах древесины.

3. Огнестойкость древесины демонстрирует экстремальную зависимость от времени пропитки. Неравномерное распределение антипирена, обусловленное неоднородной волокнистой структурой древесины, может объяснить наличие максимума на кривой.

Для достижения равномерного распределения антипирена и повышения огнезащиты целесообразно изучить более длительные интервалы пропитки. Дополнительные исследования структуры древесины (плотность слоёв, проницаемость) могут помочь оптимизировать процесс диффузии раствора антипирена.

Литература

- Асеева Р.М. Горение и пожарная опасность древесины / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 19–32.
- Полищук Е.Ю. Древесина как элемент конструктивной огнезащиты / Е.Ю. Полищук, П.В. Халепа, А.Б. Сивенков // Технологии техносферной безопасности. – 2019. – № 1(83). – С. 34–41. – DOI 10.25257/TTS.2019.1.83.34-41.
- Tsapko Yu. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings / Yu. Tsapko, A. Tsapko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 10. – P. 50–55. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.102393.
- Nagrodzka M. Impregnation of the wood by flame retardants / M. Nagrodzka, D. Małozieć // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. – 2011. – Vol. 23, № 3. – P. 69–75.
- Examination of the fire performance of wood materials treated with diferent precautions / E. Lubl6y1, D.T. M6sz6ros, L.G. Takas [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – 148 (1). – DOI 10.1007/s10973-023-12050-2
- Добрынина Н.Ю. Влияние огнезащитных составов на энергию активации процесса термической деструкции древесины / Н.Ю. Добрынина, Т.В. Якубова // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : сборник материалов Дней науки с международным участием, посвященных 90-летию Гражданской обороны России. В 2-х частях, Екатеринбург, 26–28 октября 2022 года. Том Часть 1. – Екатеринбург : Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 64–67.
- Леонович А.А. Сравнительный анализ эффективности огнезащитных средств на примере древесных материалов / А.А. Леонович, А.В. Шеломов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2013. – № 204. – С. 161–171.
- Добрынина Н.Ю. Влияние способа пропитки древесины на потерю массы образца после огневых испытаний / Н.Ю. Добрынина, Т.В. Якубова // Современные проблемы обеспечения безопасности : сборник материалов XXVI Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 24–25 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2024. – С. 36–40.
- Исследование возможности применения гравиметрического метода для изучения эффективности огнезащитных

- составов / Н.Ю. Добрынина, С.Н. Пазникова, Т.В. Якубова, А.В. Кокшаров // Техносферная безопасность. – 2022. – № 1(34). – С. 16–23.
10. Применение экспресс-методов для изучения эффективности огнезащитных составов / Н.Ю. Добрынина, С.Н. Пазникова, Т.В. Якубова, И.М. Фоминых // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации : сборник материалов Дней науки с международным участием, посвященных 90-летию Гражданской обороны России. В 2-х частях, Екатеринбург, 30 мая – 03 2022 года / Редколл. М.В. Елфимова, О.Ю. Демченко, О.В. Беззапонная [и др.]. Том Часть 1. – Екатеринбург : Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 118–121.
 11. Добрынина Н.Ю. Комплексный подход к оценке огнезащитной эффективности огнезащитных составов для древесины / Н.Ю. Добрынина, Т.В. Якубова // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности : Сборник трудов секции № 9 XXXIV Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2024 года. – Химки : Академия гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2024. – С. 69–75.
 12. Защита деревянных строительных конструкций от воздействия пожара и плесневых грибов / Н.Ф. Артеменко, Л.С. Садриева, Е.И. Деревянко [и др.] // Строительные материалы. – 2002. – № 6. – С. 12.
 13. Травкин, А.В. Методы защиты деревянных конструкций от воздействий внешних факторов для увеличения срока эксплуатации в промышленных, гражданских зданиях и сооружениях / А. В. Травкин // Наукосфера. – 2020. – № 1. – С. 26–29. – DOI 10.5281/zenodo.3634703.
 14. Horrocks A.R. Fire-Retardant Treatments for Wood: Current Status and Future Prospects / A.R. Horrocks, D. Price // Polymer Degradation and Stability. – 2001. – Vol. 74, № 2. – P. 181–195.
 15. Смирнов С.А. Исследование и разработка технологии огнегашающих материалов на основе фосфатов аммония : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.01 / С.А. Смирнов. – Иваново, 2011. – 167 с.
 16. Schartel B. Effectiveness of Amine Salts as Synergists in Ammonium Phosphate-Filled Wood Plastics Composite / B. Schartel, N. Blumstein // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2009. – Vol. 48, № 13. – P. 6057–6064.
 17. Wang X. Surface Modification of Wood Using Diammonium Phosphate Treatment / X. Wang [et al.] // BioResources. – 2015. – Vol. 10, № 2. – P. 2167–2179.
 18. Wang Y. Novel Flame-Retardant System Based on Ammonium Phosphate for Improving Fire Resistance of Wood / Y. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 164. – P. 382–391.
 6. Dobrynina N.Yu. Influence of fire retardant compositions on the activation energy of the process of thermal destruction of wood / N.Yu. Dobrynina, T.V. Yakubova // Actual problems and innovations in ensuring safety: a collection of materials from the Days of Science with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the Civil Defense of Russia. In 2 parts, Ekaterinburg, October 26–28, 2022. Volume Part 1. – Ekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – P. 64–67.
 7. Leonovich A.A. Comparative analysis of the effectiveness of fire retardants on the example of wood materials / A.A. Leonovich, A.V. Sheloumov // Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. – 2013. – № 204. – P. 161–171.
 8. Dobrynina N.Yu. Influence of the wood impregnation method on the mass loss of a sample after fire tests / N.Yu. Dobrynina, T.V. Yakubova // Modern problems of safety: Collection of materials of the XXVI International scientific and practical conference, Yekaterinburg, April 24–25, 2024. – Yekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2024. – P. 36–40.
 9. Study of the possibility of using the gravimetric method to study the effectiveness of fire-retardant compositions / N.Yu. Dobrynina, S.N. Paznikova, T.V. Yakubova, A.V. Koksharov // Technosphere safety. – 2022. – № 1 (34). – P. 16–23.
 10. Application of express methods to study the effectiveness of fire-retardant compositions / N.Yu. Dobrynina, S.N. Paznikova, T.V. Yakubova, I.M. Fominykh // Actual problems of security in the Russian Federation: Collection of materials from the Days of Science with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the Civil Defense of Russia. In 2 parts, Yekaterinburg, May 30 – March 03, 2022 / Editorial board M.V. Elfimova, O.Yu. Bezzaponnaya [et al.]. Volume Part 1. – Ekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – P. 118–121.
 11. Dobrynina N.Yu. An integrated approach to assessing the fire protection efficiency of fire retardant compositions for wood / N.Yu. Dobrynina, T.V. Yakubova // Actual problems of ensuring fire safety: Collection of works of section № 9 of the XXXIV International scientific and practical conference, Khimki, March 01, 2024. – Khimki: Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after Lieutenant General D.I. Mikhailik, 2024. – P. 69–75.
 12. Protection of wooden building structures from fire and mold / N.F. Artemenko, L.S. Sadrieva, E.I. Derevyanko [et al.] // Construction materials. – 2002. – № 6. – P. 12.
 13. Travkin A.V. Methods of protecting wooden structures from external factors to increase the service life in industrial, civil buildings and structures / A.V. Travkin // Naукosфера. – 2020. – № 1. – P. 26–29. – DOI 10.5281/zenodo.3634703.
 14. Horrocks A.R. Fire-Retardant Treatments for Wood: Current Status and Future Prospects / A.R. Horrocks, D. Price // Polymer Degradation and Stability. – 2001. – Vol. 74, № 2. – P. 181–195.
 15. Smirnov S.A. Research and Development of Technology of Fire Extinguishing Materials Based on Ammonium Phosphates : Dis. ... cand. of Engineering Sciences: Spec. 05.17.01 / S.A. Smirnov. – Ivanovo, 2011. – 167 p.
 16. Schartel B. Effectiveness of Amine Salts as Synergists in Ammonium Phosphate-Filled Wood Plastics Composite / B. Schartel, N. Blumstein // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2009. – Vol. 48, № 13. – P. 6057–6064.
 17. Wang X. Surface Modification of Wood Using Diammonium Phosphate Treatment / X. Wang [et al.] // BioResources. – 2015. – Vol. 10, № 2. – P. 2167–2179.
 18. Wang Y. Novel Flame-Retardant System Based on Ammonium Phosphate for Improving Fire Resistance of Wood / Y. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 164. – P. 382–391.

References

1. M. Aseeva, B.B. Serkov, A.B. Sivenkov // Fire and explosion safety. – 2012. – Vol. 21, № 1. – P. 19–32.
2. Polischuk E.Yu. Wood as an element of structural fire protection / E.Yu. Polischuk, P.V. Khalepa, A.B. Sivenkov // Technologies of technosphere safety. – 2019. – № 1 (83). – P. 34–41. – DOI 10.25257/TTS.2019.1.83.34–41.
3. Tsapko Yu. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings / Yu. Tsapko, A. Tsapko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 10. – P. 50–55. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.102393.
4. Nagrodzka, M. Impregnation of the wood by flame retardants / M. Nagrodzka, D. Małozieć // Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. – 2011. – Vol. 23, № 3. – P. 69–75.
5. Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions / E. Lublóyl, D.T. Mészáros, L.G. Takas [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – 148 (1). – DOI 10.1007/s10973-023-12050-2