УДК 674.048 DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-115-122

Исследование эффективности комплексных огнезащитных пропиточных составов для древесины

М.А. Красильникова[1a], А.А. Баёв[1b], М.Н. Тухбатулин[1c], А.Е. Шкуро[2d], А.В. Артемов[2e]

[1]Уральский институт ГПС МЧС России, Мира, 22, Екатеринбург, Россия
[2]Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, 37, Екатеринбург, Россия
[a] krasilnikova79@mail.ru, [b] pancho.99@inbox.ru, [c] tuchbatulin93@mail.ru, [d] shkuroae@m.usfeu.ru, [e] artemovav@m.usfeu.ru
[a] https://orcid.org/0000-0002-3103-4719, [b] https://orcid.org/0009-0002-1121-6360,
[c] https://orcid.org/0009-0004-4586-1143, [d] https://orcid.org/0000-0003-4016-2269
[d] https://orcid.org/0000-0001-6994-0154
Статья поступила 26.03.2025, принята 22.04.2025

Древесина является одним из наиболее востребованных материалов в строительной отрасли благодаря своей доступности, легкости обработки и эстетическим качествам. Однако ее высокая воспламеняемость представляет серьезную угрозу пожарной безопасности зданий и сооружений. Для снижения этой опасности применяются различные огнезащитные составы – антипирены, которые помогают замедлить распространение огня и снизить потерю прочности древесины под воздействием высоких температур. В настоящей работе представлен разработанный водный пропиточный раствор, который включает в себя комбинацию нескольких типов антипиренов с разными механизмами действия. Это позволяет обеспечить многослойную защиту материала от термического разрушения. Исследование было направлено на изучение влияния различных компонентов смеси на огнеупорные свойства древесины и выявление оптимальных составов для обеспечения максимальной эффективности. Экспериментальная часть работы заключалась в обработке образцов древесины методом полного погружения в приготовленные растворы. После сушки образцы сжигали в огневой трубе для оценки их стойкости к воздействию открытого пламени. Наилучшие показатели огнезащиты продемонстрировал состав, состоящий из 10,7% фосфата аммония и 10,7% жидкого стекла. Этот состав обеспечил минимальную потерю массы (24,3 %), что соответствует требованиям второго класса огнезащитной эффективности согласно стандарту ГОСТ 53292-2009. Корреляционный анализ также выявил значимую отрицательную зависимость между потерей массы и содержанием фосфата аммония, а также поверхностно-активного вещества ОП-7 в составе. Напротив, добавление тетрабората натрия приводило к увеличению потерь массы. Полученные результаты показали высокую эффективность разработанного огнезащитного раствора и необходимость дальнейшего исследования для улучшения его долговечности, устойчивости к вымыванию и экологической безопасности.

Ключевые слова: древесина; огнезащита; комплексные антипирены; пропиточный раствор; поверхностно активные вещества, огнезащитный состав.

Study of the complex wood fire retardant impregnating solutions

M.A. Krasilnikova[1a], A.A. Bayov[1b], M.N. Tukhbatulin[1c], A.E. Shkuro[2d], A.V. Artyomov[2e]

[1]Ural Institute of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 22, Mira St., Ekaterinburg, Russia
[2]Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia
[a] krasilnikova79@mail.ru, [b] pancho.99@inbox.ru, [c] tuchbatulin93@mail.ru, [d] shkuroae@m.usfeu.ru, [e] artemovav@m.usfeu.ru
[a] https://orcid.org/0000-0002-3103-4719, [b] https://orcid.org/0009-0002-1121-6360,
[c] https://orcid.org/0009-0004-4586-1143, [d] https://orcid.org/0000-0003-4016-2269
[d] https://orcid.org/0000-0001-6994-0154
Received 26.03.2025, accepted 22.04.2025

Wood is one of the most popular materials in the construction industry due to its availability, ease of processing and aesthetic qualities. However, its high flammability poses a serious threat to the fire safety of buildings and structures. To reduce this danger, various fire-protective compounds are used, namely, fire retardants, which help slow down the spread of fire and reduce the loss of strength of wood under the influence of high temperatures. In this work, an aqueous impregnating solution has been developed, which includes a combination of several types of fire retardants with different mechanisms of action. This allows for multi-layer protection of the material from thermal destruction. The study is aimed at studying the effect of various components of the mixture on the fire-resistant properties of wood and identifying optimal compositions to ensure maximum efficiency. The experimental part of the work consists of processing wood samples by completely immersing them in the prepared solutions. After drying, the samples are burned in a fire tube to assess their resistance to open flame. The best fire protection indicators are demonstrated by the composition consisting of 10.7% ammonium phosphate and 10.7% liquid glass. This composition ensures minimal weight loss (24.3%), which meets the requirements of the second class of fire protection efficiency according to the GOST 53292-2009 standard. Correlation analysis also reveals a significant negative relationship between weight loss and the content of ammonium phosphate, as well as the surfactant OP-7 in the composition. On the contrary, the addition of sodium tetraborate leads to an increase in weight loss. The obtained results show the high efficiency of

the developed fire protection solution and the need for further research to improve its durability, resistance to washout and environmental safety.

Keywords: wood; fire protection; fire retardants; complex retardants; impregnating solution; surfactants, fire retardant composition.

Введение. Древесина является одним из наиболее востребованных строительных материалов благодаря своей экологичности, прочности и эстетической привлекательности. По данным международных организаций, мировое потребление древесины в строительстве составляет около 2–3 млрд м³ в год, причем значительная часть используется в жилищном и коммерческом строительстве. В странах Северной Америки и Европы на древесину приходится до 40 % строительных материалов, в то время как в Азии и развивающихся странах этот показатель ниже, но растет [1–3].

С ростом использования древесины в строительстве увеличиваются требования к ее огнестойкости. Современные нормы пожарной безопасности требуют более эффективных и долговечных средств защиты древесины от возгорания. Для снижения горючести древесины применяются различные методы обработки, которые замедляют воспламенение, уменьшают скорость распространения огня и снижают токсичность продуктов горения [4, 5].

Использование специальных пропиточных растворов – самый распространенный способ защиты древесины от огня. Антипирены, входящие в состав пропиточного раствора, обеспечивают защиту древесины различными способами. Основные механизмы их действия можно разделить на следующие типы [6, 7]:

– ингибиторы горения замедляют процесс окисления древесины за счет выделения негорючих газов (водяной пар, азот, углекислый газ, аммиак);

– катализаторы образования углеродистой корки образуют при нагреве защитный слой, предотвращающий доступ кислорода;

– термостойкие покрытия создают защитную пленку, устойчивую к высоким температурам.

– нанокомпозитные антипирены [8], представляющие собой огнезащитные материалы, в состав которых входят наночастицы (обычно размером менее 100 нм); они используются для повышения огнестойкости различных материалов, включая древесину, а их механизм огнезащитного действия основан на нескольких процессах: наночастицы формируют защитный слой, препятствующий доступу кислорода и распространению пламени, катализируют образование плотной угольной корки, замедляющей горение, рассеивают и поглощают тепло, снижая скорость нагрева материала, а также усиливают эффективность традиционных антипиренов за счет синергетического взаимодействия.

Пропиточные растворы могут содержать различные химические соединения, которые снижают горючесть древесины. Согласно наиболее общей классификации, выделяют следующие типы антипиренов.

Первый тип – это минеральные соли (солевые антипирены), к которым относятся фосфаты [9], образующие защитный слой на поверхности образца древесины; бораты (борная кислота, бура, метаборат натрия), замедляющие, разложение древесины и снижающие температуру воспламенения; соли аммония (сульфаты, хлориды), выделяющие негорючие газы при разложении и уменьшающие концентрацию кислорода. К преимуществам минеральных антипиренов следует прежде всего их доступность и экологичность. Главным недостатком минеральных антипиренов является то, что они подвержены вымыванию, и после экспонирования в условиях высокой влажности, обработанная ими древесина требует повторной пропитки.

Следующий тип представляет собой органические соединения. К ним относятся полимерные антипирены [10, 11], образующие защитное покрытие, препятствующее нагреву и горению образцов, а также кремнийорганические соединения, создающие термостойкую пленку на поверхности древесины. Преимуществами антипиренов органического происхождения являются долговечность, устойчивость к влаге, а основными недостатками – высокая стоимость и относительно высокая сложность нанесения.

Третий тип – галогенсодержащие антипирены [12–14]. Это вещества, содержащие хлор, бром, фтор или йод, используемые для снижения горючести материалов, включая древесину. Они являются одними из наиболее эффективных огнезащитных добавок благодаря способности подавлять горение на молекулярном уровне. Галогенсодержащие антипирены подавляют свободные радикалы, выделяя галогены в газовую фазу, где они реагируют с активными радикалами, предотвращая распространение пламени. Одновременно они снижают концентрацию кислорода в зоне горения, создавая защитную атмосферу, а также катализируют разложение органических веществ, способствуя образованию угольного остатка, который препятствует дальнейшему горению. Галогенсодержащие антипирены обладают высокой эффективностью, но их применение ограничивается экологическими нормами. Современные тенденции направлены на замену таких соединений менее токсичными альтернативами.

Еще один тип антипиренов – это комплексные составы. К ним относятся смеси минеральных солей и органических соединений. Такие композиции обладают преимуществами разных компонентов, повышая эффективность защиты. Преимущества комплексных огнезащитных составов заключаются в их высокой эффективности и универсальности. В тоже время комплексные антипирены имеют высокую стоимость, возможную токсичность, сложность нанесения, могут изменять свойства древесины, обладают различной степенью устойчивости к влаге и ограниченной совместимостью с другими защитными составами. Несмотря на высокую эффективность, комплексные антипирены требуют внимательного выбора с учетом условий эксплуатации древесины, экономических и экологических факторов. Важно учитывать возможные недостатки, особенно при использовании в жилых помещениях и во влажных средах [15].

Основными компонентами нанокомпозитных антипиренов являются: наноглины (монтмориллониты, као-

лин, бентонит), создающие термостойкий барьер, наночастицы оксидов металлов (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3), улучшающие теплопроводность и отвод тепла, углеродные наноматериалы (графен, нанотрубки, сажа), способствующие образованию углеродного остатка и подавлению горения, а также фосфор- и борсодержащие наночастицы, усиливающие огнезащитный эффект за счет катализа химических реакций.

Выбор антипирена зависит от условий эксплуатации древесины, требуемой долговечности защиты и стоимости обработки. Минеральные соли подходят для внутренних конструкций, тогда как органические и комплексные составы эффективнее для наружного применения.

Существующие антипирены имеют ряд недостатков: солевые составы подвержены вымыванию, что снижает их эффективность во влажных условиях, некоторые компоненты обладают токсичностью, ограничивая применение в жилых и общественных зданиях, а также возможны изменения прочностных характеристик древесины после обработки. Кроме того, термостойкость отдельных покрытий остается недостаточной при длительном воздействии высоких температур. Современные разработки направлены на создание негорючих, нетоксичных и устойчивых к вымыванию составов, соответствующих строгим экологическим стандартам и исключающих вредные соединения, такие как формальдегиды и тяжелые металлы. Для повышения эффективности новые антипирены должны обеспечивать глубокую и долговечную защиту, не требовать частой повторной обработки и быть совместимыми с антисептиками и гидрофобизаторами. Внедрение инновационных технологий, включая использование наноматериалов, кремнийорганических соединений и полимерных покрытий, позволит улучшить проникающую способность составов, повысить их устойчивость к вымыванию и увеличить предел огнестойкости.

Разработка новых комплексных антипиренов особенно актуальна в связи с необходимостью повышения пожарной безопасности, устранения недостатков существующих решений, соблюдения экологических требований и внедрения современных технологий защиты древесины.

Цель данной работы – разработка состава комплексного огнезащитного водного пропиточного раствора для древесины, содержащего смесь антипиренов с различным химическим составом и механизмом защиты от огня. В рамках исследования проводилась оценка эффективности пропиточного раствора, анализ влияния его компонентов на горючесть древесины, а также определение оптимальной рецептуры огнезащитного состава.

Экспериментальная часть. Антипирены, использованные для создания огнезащитной композиции представлены в табл. 1. Огнезащитный состав, полученный на основе продуктов аминолиза полиэтилентерефталата (ПЭТФ), был синтезирован согласно методике, представленной в работе [16]. Кроме того, в состав композиции было введено неионогенное поверхностно активное вещество ОП-7 (ГОСТ 8433-81), получаемое путем обработки смеси моно- и диалкилфенолов окисью этилена. Для оценки влияния содержания компонентов на огнезащитную способность пропиточного раствора был проведен многофакторный отсеивающий эксперимент по методу Плакетта-Бермана. Матрица планирования эксперимента с натуральными значениями факторов приведена в табл. 2.

Таблица. 1. Характеристика использованных антипиренов

№	Наименование	Химическая формула	М.м., Да	Плотность, г/см^3	Растворимость в воде, г/100 мл	Механизм термического разложения
1	Фосфат аммония однозамещенный	$NH_4H_2PO_4$	115	1,8	35,3	$2\,NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{140\,^oC} (NH_4)_2H_2P_2O_7 + H_2O$ $3\,NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{170\,^oC} (NH_4)_3H_2P_3O_{10} + 2\,H_2O$ $NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{190\,^oC} NH_4PO_3 + H_2O$ $NH_4H_2PO_4 \xrightarrow{250\,^oC} HPO_3 + NH_3 + H_2O$
2	Тетраборат натрия	$Na_2B_4O_7\times10H_20$	382	2,37	3,2 (25 °C) 10,5 (50 °C)	$Na_2B_4O_7\bullet10H_2O \xrightarrow{390^oC} Na_2B_4O_7 + 10H_2O$
3	Жидкое стекло	$Na_2SiO_3\times$ $9H_2O$	284	2,61	92,39	$Na_2SiO_3\times9H_2O \xrightarrow{100^oC\text{-}300^oC} Na_2SiO_3 + 9H_2O$
4	ОЗС на основе продуктов аминолиза ПЭТФ	ОЗС	432	1,22	45	$ОЗС \xrightarrow{T^oC} NH_3 + H_2O + CO_2 + CH_3NH_2 + HCl$

Таблица 2. Рецептуры пропиточных растворов

№	Содержание компонента, %					
	ОЗС на основе продуктов аминолиза ПЭТФ (Z_1)	ОП-7 (Z_2)	Тетраборат натрия (Z_3)	Фосфат аммония (Z_4)	Жидкое стекло (Z_5)	Вода (Z_6)
1	0,7	0,0	10,7	10,7	0,0	77,9
2	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	98,9
3	3,6	0,0	0,0	0,0	10,7	85,7
4	0,7	0,0	0,0	10,7	10,7	77,9
5	3,6	0,4	10,7	10,7	10,7	63,9
6	3,6	0,4	0,0	10,7	0,0	85,4
7	0,7	0,4	10,7	0,0	10,7	77,5
8	3,6	0,0	10,7	0,0	0,0	85,7

Для определения эффективности огнезащитного действия полученных пропиточных растворов изготавливали образцы размерами 17×35×86 мм из прямослойной древесины сосны. Образцы пропитывались огнезащитным составом методом полного погружения в раствор на 24 ч, после этого они высушивались до постоянной массы при комнатной температуре, высушенные образцы взвешивались. Испытание проводилось на установке керамическая труба (рис. 1) в вытяжном шкафу с принудительной вентиляцией со скоростью движения воздуха не более 5 м/с.

Керамический короб переводили в горизонтальное положение и зажигали газовую горелку, устанавливая высоту пламени 15 см. После этого керамический короб возвращали в вертикальное положение. Образец держали в пламени горелки в течение 2 мин. Расход газа в процессе испытания оставался постоянным. Через 2 мин подачу газа в горелку прекращали, образец оставляли в металлической емкости до остывания до комнатной температуры (рис. 2).

После остывания оставшуюся часть образца извлекали из керамического короба и взвешивали, результат округляли до 0,1 г. Потерю массы (P_i, %) образца после проведения испытания вычисляли по формуле

$$P_i = \frac{(m_{1i} - m_{2i})100}{m_{1i}},$$

где m_{1i} – масса образца до испытания, г; m_{2i} – масса образца после испытания, г; i – номер образца.

Полученный результат вычисления округляли до 0,1 %.

Рис.1 Установка для определения огнестойкости пропитанной древесины

Рис. 2. Образцы древесины после испытаний

Для полученных в исследовании пропиточных растворов были определены следующие показатели: сухой остаток, количество выпавшего осадка после 7 суток с момента приготовления раствора, условная вязкость раствора (определялась с помощью вискозиметра ВЗ-4), абсолютная вязкость раствора (определялась с помощью ротационного вискозиметра), плотность пропиточного раствора (определялась пикнометрическим методом). Для образцов древесины обработанных растворами антипиренов помимо показателя потери массы после сжигания в огневой трубе выявлялось содержание золы неорганических веществ путем сжигания образца в муфельной печи.

Анализ результатов. Результаты определения свойств пропиточных растворов и обработанных ими образцов древесины приведены в табл. 3. Наибольшей огнестойкостью характеризуется образцы древесины, пропитанные раствором № 4. Показатель потери массы после испытаний в огневой трубе для этой группы образцов в среднем составил 24,3 %. Также высокую огнестойкость продемонстрировали образцы древесины, пропитанные раствором № 6. Их средний показатель потери массы после сжигания в огневой трубе составил 24,8 %. Такие результаты позволяют отнести композиции № 4 и 6 ко второй категории огнезащитной эффективности по ГОСТ 53292-2009.

Для выявления степени и направления взаимосвязи между входными и выходными факторами эксперимента был проведен корреляционный анализ (табл. 4). Его результаты свидетельствуют о том, что наиболее тесную отрицательную связь с показателем потери массы после сжигания в огневой трубе обработанных

образцов древесины среди входных факторов эксперимента имеют содержание в композиции монофосфата аммония (коэффициент парной линейной корреляции r_{xy} = – 0,84) и содержание поверхностно активного вещества ОП-7 (r_{xy} = – 0,29). Введение жидкого стекла в состав пропиточного раствора также коррелирует с уменьшением потери массы образцами древесины после испытаний на огнестойкость, однако теснота (сила) связи характеризуется как очень низкая (r_{xy} = – 0,11).

В тоже время увеличение содержания буры (тетрабората натрия) коррелирует с ростом показателя потери массы после сжигания образов древесины в огневой трубе. Это объясняется тем, что тетраборат натрия в рассматриваемых композициях может терять свою огнезащитную эффективность из-за химических реакций с фосфатом аммония и жидким стеклом, приводящих к изменению механизма действия антипирена и образованию неактивных соединений.

Присутствие поверхностн-активного вещества (ПАВ) ОП-7 стабилизирует исследуемые пропиточные растворы и снижает количество выпадающего в них осадка, что является положительным фактором с точки зрения эффективности проникновения антипиренов в структуру древесины. При этом рассматриваемое ПАВ также снижает плотность водных растворов минеральных антипиренов. Возможное объяснение наблюдаемого явления – это способность ПАВ влиять на процесс гидратации ионов минеральных солей. Гидратированные ионы занимают больше пространства, чем негидратированные, что может способствовать снижению плотности раствора.

Увеличение вязкости раствора антипиренов коррелирует с падением показателя потери массы после сжигания образцов древесины. Однако подобная корреляция может быть объяснена наличием общей причины изменения названных показателей, а именно увеличением содержания гидратированных ионов минеральных антипиренов в воде. Таким же образом можно объяснить связь между плотностью пропиточного раствора, количеством осадка, выпавшего из раствора после 7 суток выдержки, и потерей массы образцами древесины после проведения испытаний на огнестойкость.

Зольность образца древесины, обработанного пропиточным раствором, является показателем, косвенно характеризующим эффективность процесса пропитки. Однако этот показатель не учитывает механизм разложения исследуемых антипиренов и может применяться для оценки эффективности пропитки с существенными оговорками. Наиболее сильно зольность коррелирует с содержанием в композиции фосфата аммония (r_{xy} = 0,58) и жидкого стекла (r_{xy} = 0,49), наименее выражена связь зольности и содержания тетрабората натрия (r_{xy} = 0,20). Корреляционная связь между зольностью и содержанием ПАВ ОП-7 носит обратный характер (r_{xy} = – 0,41).

Для выявления зависимости между входными факторами эксперимента и показателем потери массы образцами древесины после их сжигания в огневой трубе был проведен регрессионный анализ. В результате для доверительной вероятности 0,95 была предложена следующая математическая модель: Y = 34,82 - 7,44·Z_2 + 0,23·Z_3 0,71·Z_4 (R^2 = 0,87, стандартная ошибка модели – 2,31 %). Графическая интерпретация разработанной модели представлена на рис. 3.

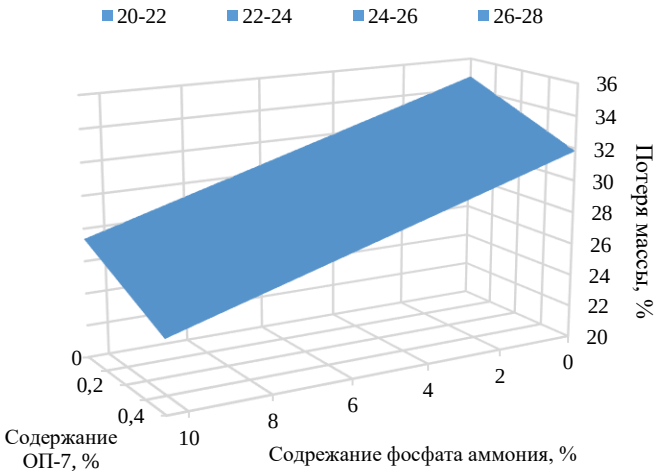

Рис. 3. Зависимость показателя потери массы в результате сжигания образца древесины в огневой трубе от содержания в растворе фосфата аммония (Z_4) и ОП-7 (Z_2) в отсутствии тетрабората натрия (Z_3)

Таблица 3. Результаты испытаний огнезащитных составов и пропитанных образцов древесины

№	Показатель						
	Сухой остаток, %	Количество выпавшего осадка, г/100 г раствора	Условная вязкость раствора, сек	Вязкость раствора, сПз	Плотность раствора, г/мл	Зольность пропитанного образца древесины, %	Потеря массы после сжигания в огненной трубе, %
1	21,8	0,15	10,6	81,8	1,14	3,8	32,0
2	0,3	0,00	10,1	79,9	1,03	0,0	32,9
3	12,4	3,46	10,3	79,1	1,07	4,1	36,7
4	21,8	8,15	11,1	92,9	1,13	6,3	24,3
5	33,8	6,55	11,9	97,3	1,09	6,6	27,3
6	12,4	0,18	10,3	77,8	1,07	3,2	24,8
7	21,8	0,10	10,1	76,7	1,05	2,0	33,4
8	12,4	9,43	11,7	83,6	1,08	4,3	35,9

Таблица 4. Результаты корреляционно анализа

	Содержание ОЗС на основе прод. амин. ПЭТФ, %	Содержание ОП-7, %	Содержание тетрабората натрия, %	Содержание фосфата аммония, %	Содержание жидкого стекла, %	Сухой остаток, %	Кол-во осадка, г/100 г раствора	Условная вязкость раствора, сек	Вязкость раствора, сПз	Плотность р-ра, г/мл	Зольность, %	Потеря массы, %
Содержание ОЗС на основе прод. амин. ПЭТФ, %	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Содержание ОП-7, %	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Содержание тетрабората натрия, %	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Содержание фосфата аммония, %	0,00	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
Содержание жидкого стекла, %	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	–	–	–	–	–	–	–
Сухой остаток, %	0,07	0,00	0,58	0,58	0,58	1,00	–	–	–	–	–	–
Кол-во осадка г/100 г р-ра	0,37	-0,48	0,15	0,07	0,28	0,31	1,00	–	–	–	–	–
Усл. вязкость, сек	0,43	-0,24	0,46	0,32	0,13	0,55	0,86	1,00	–	–	–	–
Вязкость, сПз	0,12	-0,10	0,17	0,54	0,41	0,66	0,70	0,82	1,00	–	–	–
Плотность р-ра, г/мл	-0,18	-0,65	0,18	0,71	0,06	0,53	0,34	0,41	0,49	1,00	–	–
Зольность, %	0,38	-0,41	0,20	0,58	0,49	0,76	0,74	0,77	0,80	0,68	1,00	–
Потеря массы, %	0,06	-0,29	0,27	-0,84	-0,11	-0,39	-0,08	-0,19	-0,50	-0,38	-0,41	1,00

Регрессионный анализ показал, что использование модифицированных ортофосфорной кислотой продуктов аминолиза ПЭТФ и натриевого жидкого стекла в огнезащитной пропиточной композиции характеризуется низкой эффективностью, поскольку их влияние на показатель потери массы древесных образцов после сжигания в огневой трубе незначительно. Регрессионный анализ также подтвердил наличие обратного эффекта при использовании в пропиточном растворе тетрабората натрия. Наибольшей эффективностью характеризуется применение в качестве компонентов пропиточного раствора фосфата аммония и поверхностно активного вещества ОП-7. Применение последнего улучшает смачивание и проникновение пропиточных растворов в древесину, обеспечивая равномерное распределение антипиренов и стабилизируя состав раствора. Поверхностно-активные вещества способствуют удержанию компонентов раствора в древесине, уменьшают их вымывание, а также могут усиливать углеобразование при нагревании, что замедляет горение.

Таким образом, оптимальным составом огнезащитного пропиточного раствора для древесины будет являться композиция, содержащая 0,4 мас. % поверхностно активного вещества ОП-7 и 10,7 мас. % монофосфата аммония.

Заключение. В ходе проведенного исследования был разработан комплексный огнезащитный водный пропиточный раствор для древесины, содержащий смесь антипиренов с различным химическим составом и механизмом защиты от огня. Экспериментальные испытания показали, что наиболее эффективные рецептуры обеспечивают снижение горючести древесины до уровня второй группы огнезащитной эффективности по ГОСТ 53292-2009.

Анализ полученных результатов позволил выявить ключевые факторы, влияющие на эффективность пропитки. Было установлено, что введение монофосфата аммония и поверхностно-активного вещества ОП-7 значительно снижает потерю массы обработанных образцов после термического воздействия. Одновременно с этим использование тетрабората натрия в составе пропиточного раствора в ряде случаев приводило к снижению огнезащитной эффективности, что может быть связано с химическими взаимодействиями компонентов и изменением их механизма действия.

Исследование также показало, что высокая вязкость пропиточного раствора положительно коррелирует с его огнезащитными свойствами, так как она свидетельствует о большей концентрации активных антипиренов в составе. Кроме того, присутствие поверхност-

но-активных веществ способствует лучшему проникновению раствора в структуру древесины, повышая устойчивость пропитки к внешним воздействиям.

Результаты исследования подтвердили высокую эффективность разработанного огнезащитного раствора, а также подчеркнули необходимость дальнейших исследований для повышения его долговечности, стойкости к вымыванию и экологической безопасности.

Литература

1. Чураева М.М. Современные экологические аспекты применения древесины в архитектуре // Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ: Тез. докл. Междунар. науч.-практич. конф. профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов, Москва, 02-06 апреля 2018 г. Т. 2. М.: Изд-во Моск. архитектур. ин-та (гос. академии), 2018. С. 290.
2. Ремизова В.М. Древесина – экологически чистый и экономически выгодный строительный материал // Научные итоги: достижения, проекты, гипотезы: строительство и архитектура, педагогика и психология, экономика и бухучет, информационные технологии, мировоззрение, естествознание, юриспруденция: Сб. науч. докл. № 19 XIX-ой Междунар. науч.-практич. конф., Минеральные Воды, 27 марта 2014 г. Минеральные воды: Копировально-множительное бюро Северо-Кавказ. ф-ла Белгород. гос. технологич. ун-та, 2014. С. 57-61.
3. Пармаксыз В.А. Древесина в многоэтажном строительстве // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сб. статей по мат-лам 75-й науч.-практич. конф. студентов по итогам НИР за 2019 г., Краснодар, 02-16 марта 2020 г. Краснодар: зд-во Кубан. гос. аграр. ун-та, 2020. С. 560-562.
4. Асеева Р.М. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 1. С. 19-32.
5. Полищук, Е. Ю. Древесина как элемент конструктивной огнезащиты // Технологии техносферной безопасности. 2019. № 1(83). С. 34-41. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.34-41
6. Tsapko Yu. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings // Eastern-European Journ. of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, № 10(87). P. 50-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393
7. Nagrodzka M. Impregnation of the wood by flame retardants // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. 2011. Vol. 23, № 3. P. 69-75.
8. Хархуш А.А. Стратегии антипиренов и эффект физического барьера наночастиц для улучшения тепловых характеристик полимера // Химическая технология. 2021. Т. 22, № 3. С. 98-108. DOI: 10.31044/1684-5811-2021-22-3-98-108
9. Лунева Н.К. Влияние модификаторов огнезащитного состава на процесс термического разложения древесины // Журнал прикладной химии. 2011. Т. 84, № 10. С. 1686-1690.
10. Ахраров Б.Б. Полимерные антипирены для снижения горючести целлюлозных материалов // Пластические массы. 2017. № 5-6. С. 45-47.
11. Ахраров Б.Б. Разработка новых полимерных антипиренов для древесины // Химия и химическая технология. 2016. Т. 51, № 1. С. 49-51.
12. Зарипов И.И., Вихарева И.Н., Буйлова Е.А., Берестова Т.В., Мазитова А.К. Добавки для понижения горючести полимеров / // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Т. 14, № 2. С. 156-161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
13. Богданова В.В., Климовцева И.А., Федеев С.С., Лесникович А.И. Исследование причин различной эффективности антипиренов на основе Sb_2O_3 и галогенсодержащих органических соединений при горении полиолефинов // Химическая физика. 1990. Т. 9, № 12. С. 1678-1681.
14. Селиверстов В. В. Антипирены для полимерных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 8. С. 42-47. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-8-42-47
15. Леонович А.А. Сравнительный анализ эффективности огнезащитных средств на примере древесных материалов // Изв. Санкт-Петербург. лесотехнич. академии. 2013. № 204. С. 161-171.
16. Shishlov O., Dozhdikov S., Glukhikh V. Synthesis of bromocardanol novolac resins and evaluation of their effectiveness as flame retard-ants and adhesives for particleboard // Journ. of Applied Polymer Science. 2017. Vol. 134, № 38. P. 45322. DOI: 10.1002/app.45322

References

1. Churaeva M.M. Modern ecological aspects of wood application in architecture // Science, education and experimental design at MArchI: Abstracts of reports of the internat. scientific and practical conf., faculty, young scientists and students, Moscow, April 2-6, 2018. Vol. 2. Moscow: Publishing House of Moscow Institute of Architecture (State Academy), 2018. P. 290.
2. Remizova V.M. Wood is an environmentally friendly and cost-effective building material // Scientific results: achievements, projects, hypotheses: construction and architecture, pedagogy and psychology, economics and accounting, information technology, worldview, natural science, jurisprudence: Collection of scientific reports № 19 of the XIX Internat. Scientific and Practical Conf., Mineralnye Vody, March 27, 2014. Mineralnye Vody: Copying and duplicating bureau of the North Caucasian Branch of the Belgorod State Technical University, 2014. P. 57-61.
3. Parmaksyz V.A. Wood in multi-story construction // Scientific support for the agro-industrial complex: Collection of articles based on the materials of the 75th scientific and practical conf. of students on the results of R&D for 2019, Krasnodar, March 02–16, 2020. Krasnodar: Publishing House of Kuban State Agrarian University, 2020. P. 560-562.
4. Aseeva R.M. Combustion and fire hazard of wood // Fire and explosion safety. 2012. Vol. 21, № 1. P. 19-32.
5. Polischuk E.Yu. Wood as an element of structural fire protection // Technologies of technosphere safety. 2019. № 1 (83). P. 34-41. DOI: 10.25257/TTS.2019.1.83.34-41
6. Tsapko Yu. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings // Eastern-European Journ. of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, № 10 (87). P. 50-55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393
7. Nagrodzka, M. Impregnation of the wood by flame retardants // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. 2011. Vol. 23, № 3. P. 69-75.
8. Kharkhush, A.A. Flame retardant strategies and the effect of the physical barrier of nanoparticles to improve the thermal characteristics of the polymer // Chemical technology. 2021. Vol. 22, № 3. P. 98-108. DOI: 10.31044/1684-5811-2021-22-3-98-108
9. Luneva N.K. Influence of fire-retardant composition modifiers on the process of thermal decomposition of wood // Journ. of Applied Chemistry. 2011. Vol. 84, № 10. P. 1686-1690.

10. Akhrarov B.B. Polymer flame retardants for reducing the flammability of cellulose materials // Plastic masses. 2017. № 5-6. P. 45-47.
11. Akhrarov B.B. Development of new polymer flame retardants for wood // Chemistry and chemical technology. 2016. Vol. 51, № 1. P. 49-51.
12. Zaripova I.I., Vikhareva I.N., Buylova E.A., Berestova T.V., Mazitova A.K. Additives for reducing the flammability of polymers // Nanotechnology in construction: scientific online journ. 2022. Vol. 14, № 2. P. 156-161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
13. Bogdanova V.V., Klimovtseva I.A., Fedeev S.S., Lesnikovich A.I. Study of the causes of different efficiency of flame retardants based on Sb_2O_3 and halogen-containing organic compounds during combustion of polyolefins // Chemical Physics. 1990. Vol. 9, № 12. P. 1678-1681.
14. Seliverstov V.V. Flame retardants for polymeric materials // Adhesives. Sealants. Technologies. 2023. № 8. P. 42-47. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-8-42-47
15. Leonovich A.A. Comparative analysis of the efficiency of fire retardants on the example of wood materials // Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy. 2013. № 204. P. 161-171.
16. Shishlov O., Dozhdikov S., Glu-khikh V. Synthesis of bromocardanol novolac resins and evaluation of their effectiveness as flame retardants and adhe-sives for particleboard // Journ. of Applied Polymer Science. 2017. Vol. 134, № 38. P. 45322. DOI10.1002/app.45322