

## Исследование влияния поверхностно-активных веществ на эффективность действия огнезащитных пропиточных растворов для древесины

М.Н. Тухбатулин<sup>1а</sup>, А.Е. Шкуро<sup>2б</sup> Т.В. Якубова<sup>1с</sup>

<sup>1</sup> Уральский институт ГПС МЧС России, улица Мира, д. 22, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, 37, Екатеринбург, Россия

<sup>а</sup> [tuchbatulin93@mail.ru](mailto:tuchbatulin93@mail.ru), <sup>б</sup> [shkuroae@m.usfeu.ru](mailto:shkuroae@m.usfeu.ru), <sup>с</sup> [tatanaakubova71723@gmail.com](mailto:tatanaakubova71723@gmail.com).

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0004-4586-1143>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0009-0006-1880-8368>

Статья поступила 15.09.2025, принята 06.11.2025

*В работе проведено сравнительное исследование влияния четырёх поверхностно-активных веществ – кокамидопропил бетаина, октилфенол этоксила (ОП-7), лауретсульфата натрия и децилглюкозида – на эффективность огнезащитной пропитки древесины растворами на основе однозамещённого фосфата аммония и тетрабората натрия. Оценивались физико-химические свойства растворов (рН, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания) и кинетика капиллярного впитывания в образцы древесины сосны обыкновенной. Установлено, что введение ПАВ во все исследованные составы снижало поверхностное натяжение на 26–47 % и краевой угол на 25–42 %, что способствовало ускорению начальной стадии пропитки. Наибольшую начальную скорость впитывания обеспечивали ОП-7 и лауретсульфат натрия, однако в огнезащитных составах скорость пропитки снижалась из-за повышенной плотности и вязкости растворов, а также возможного частичного закупоривания пор кристаллами солей. Испытания огнестойкости показали, что все ПАВ снижали потерю массы древесины на 9–19 % по сравнению с контролем; максимальный эффект достигнут при использовании кокамидопропил бетаина. Децилглюкозид обеспечивал стабильное увеличение глубины пропитки при сохранении высокой огнезащитной эффективности. Полученные результаты позволяют рекомендовать децилглюкозид для глубокой пропитки, лауретсульфат натрия – для быстрой поверхностной обработки, а кокамидопропил бетаин – для максимального повышения огнестойкости. Работа подчёркивает значимость подбора ПАВ с учётом требуемых технологических и эксплуатационных свойств пропиточных составов.*

**Ключевые слова:** древесина; огнезащита; антипирены; пропиточный раствор; поверхностно-активные вещества; ПАВ; огнезащитный состав.

## A study of the influence of surfactants on the efficiency of fire-retardant impregnating solutions for wood

M.N. Tukhbatulin<sup>1а</sup>, A.E. Shkuro<sup>2б</sup>, T.V. Yakubova<sup>1с</sup>

<sup>1</sup> Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia; 22, Mira St., Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Ural State Forestry Engineering University; 37, Sibirsky Tract St., Ekaterinburg, Russia

<sup>а</sup> [tuchbatulin93@mail.ru](mailto:tuchbatulin93@mail.ru), <sup>б</sup> [shkuroae@m.usfeu.ru](mailto:shkuroae@m.usfeu.ru), <sup>с</sup> [tatanaakubova71723@gmail.com](mailto:tatanaakubova71723@gmail.com).

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0004-4586-1143>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0009-0006-1880-8368>,

Received 15.09.2025, accepted 06.11.2025

*The paper presents a comparative study of the influence of four surfactants – cocamidopropyl betaine, octylphenol ethoxylate, sodium laureth sulfate, and decyl glucoside – on the efficiency of fire-retardant impregnation of wood with solutions based on monosubstituted ammonium phosphate and sodium tetraborate. The physicochemical properties of the solutions (pH, density, viscosity, surface tension, and contact angle) and the kinetics of capillary absorption in Scots pine wood samples are estimated. It is found that the introduction of surfactants into all the studied compositions reduces the surface tension by 26–47 % and the contact angle by 25–42 %, which contributes to the acceleration of the initial stage of impregnation. The highest initial absorption rate is ensured by octylphenol ethoxylate and sodium laureth sulfate, however, in fire-retardant compositions the impregnation rate decreases due to the increased density and viscosity of the solutions, as well as possible partial clogging of pores with salt crystals. Fire resistance tests show that all surfactants reduce wood weight loss by 9–19 % compared to the control; the maximum effect is achieved with cocamidopropyl betaine. Decyl glucoside ensures a stable increase in the impregnation depth while maintaining high fire-retardant efficiency. The obtained results allow one to recommend decyl glucoside for deep impregnation, sodium laureth sulfate for rapid surface treatment, and cocamidopropyl betaine for maximum increase in fire resistance. The study emphasizes the importance of selecting surfactants taking into account the required technological and operational properties of impregnating compositions.*

**Keywords:** wood; fire protection; fire retardants; impregnating solution; surface-active substances; surfactants; fire retardant composition.

**Введение.** Древесина, благодаря своей экологичности, доступности и высоким механическим свойствам, остаётся одним из наиболее востребованных строительных материалов. Однако её существенный недостаток – высокая горючесть – требует применения эффективных средств огнезащиты. Наиболее распространённым методом является пропитка растворами антипиренов [1–4].

Ведущую роль в этой области играют растворы на основе фосфатов аммония. Их применение охватывает строительство, ремонт, производство мебели, оборудование складов, сельское хозяйство и туристический сектор для повышения огнестойкости деревянных конструкций. Обработка такими растворами перекрытий, полов, дверей, мебели, сельхозпостроек, шпал и лесоматериалов для мостов значительно снижает их уязвимость к возгоранию [5]. Ключевые преимущества этих составов включают:

- простоту приготовления и нанесения;
- глубокое проникновение антипиренов в структуру древесины;
- обеспечение длительной защиты;
- нетоксичность и безопасность для здоровья.

Однозамещённый фосфат аммония ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) является высокоэффективным антипиреном для древесины, тканей и полимеров. Он повышает термостабильность материала, повышая температуру начала активного разложения и способствуя сохранению структуры и функциональности при нагреве. Механизм огнезащитного действия однозамещённого фосфата аммония включает комплекс физических и химических процессов [6–8]:

- эндотермическое разложение охлаждает поверхность древесины, выделяющиеся негорючие газы ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) разбавляют горючие пары, а образующаяся кислота способствует обугливанню;
- фосфорная кислота катализирует дегидратацию целлюлозы, ускоряя образование инертного углеродистого слоя (кокса), который изолирует материал от кислорода и тепла;
- образующийся защитный коксовый слой препятствует распространению пламени и пиролизу глубинных слоёв.

Эффективность огнезащиты определяется не только типом антипирена, но и качеством пропитки, главным показателем которой является интенсивность – степень проникновения и равномерность распределения состава в древесине. Контроль этого параметра критически важен по следующим причинам [3, 4, 9]:

1. Глубина и равномерность пропитки напрямую влияют на сопротивление воспламенению и распространению пламени.
2. Стандарты строго регламентируют минимальные уровни пропитки для различных условий эксплуатации.
3. Анализ взаимосвязей между интенсивностью пропитки, временем выдержки, концентрацией раствора и методом обработки позволяет повысить экономическую эффективность производства.
4. Качественная пропитка минимизирует вымывание или деградацию антипирена под действием внешних факторов, продлевая срок службы изделий.

Одним из перспективных направлений интенсификации процесса пропитки древесины огнезащитными растворами, направленной на повышение их эффективности, является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Поверхностно-активные вещества представляют собой химические соединения, ключевая особенность которых заключается в амфифильности их молекул, то есть наличии у каждой молекулы двух частей с противоположными свойствами: гидрофильной (притягивающейся к воде) «головы» и гидрофобной (отталкивающей воду) «хвоста». Основное назначение ПАВ – существенное снижение поверхностного натяжения на границах раздела фаз, например, между жидкостью и воздухом или жидкостью и твёрдым телом. Благодаря этому уникальному свойству ПАВ выполняют критически важные функции: они резко улучшают смачиваемость поверхностей, облегчают проникновение жидкостей в капилляры и поры материалов (таких как древесина или ткани), способствуют образованию и стабилизации эмульсий (смесей несмешивающихся жидкостей, как масло в воде) и суспензий (взвесей твёрдых частиц в жидкости), а также обеспечивают моющее действие, помогая отделять и удалять загрязнения с поверхностей. По типу заряда, который несёт их гидрофильная группа в водном растворе, ПАВ классифицируются на четыре основных типа: анионные (имеют отрицательный заряд, как в мылах и лаурилсульфатах, широко используются в моющих средствах), катионные (имеют положительный заряд, как четвертичные аммониевые соли, часто обладают бактерицидными и антистатическими свойствами), неионогенные (не несут электрического заряда, как этоксилаты жирных спиртов, устойчивы к жёсткой воде и изменениям pH) и амфотерные (меняют заряд в зависимости от кислотности среды, как бетаины, известны мягкостью действия). Благодаря своим универсальным свойствам, ПАВ находят широчайшее применение в самых разных отраслях: от производства бытовой химии, косметики, лекарств и пищевых продуктов до технологий в нефтедобыче, текстильной промышленности, строительстве (включая огнезащитные пропитки) и сельском хозяйстве, где они существенно повышают эффективность основных процессов и действующих веществ [10, 11].

Механизм действия ПАВ в пропиточных растворах связан в первую очередь со снижением поверхностного натяжения на границе жидкость-древесина. Это улучшает смачиваемость поверхности и способствует более глубокому и равномерному проникновению раствора в капиллярно-пористую структуру древесины [12]. ПАВ также могут диспергировать нерастворимые компоненты состава, предотвращать их агломерацию и стабилизировать раствор, обеспечивая однородность распределения антипирена. Кроме того, некоторые типы ПАВ (например, неионогенные) могут сами проявлять синергетический огнезащитный эффект, усиливая действие основных антипиренов. В результате применение ПАВ потенциально повышает общую эффективность огнезащитной обработки за счёт увеличения глубины пропитки, улучшения адгезии состава и оптимизации расхода раствора.

Перспективным представляется использование следующих видов ПАВ:

- кокамидопропил бетаин [13] – амфотерное поверхностно-активное вещество, получаемое из жирных кислот кокосового масла. Обладает умеренными пенообразующими и смачивающими свойствами, совместим с анионными и неионогенными ПАВ. Благодаря способности снижать поверхностное натяжение и повышать стабильность растворов, используется как ко-ПАВ. Эффективное снижение поверхностного натяжения достигается при концентрации в диапазоне 0,05–0,1 %.

- ОП-7 (октилфенол этоксилат) – неионогенное ПАВ, относящееся к группе этоксилатов алкилфенолов. Обладает высокой смачивающей и проникающей способностью, устойчиво к щелочной и кислой среде, применяется в промышленных и технических составах [14]. Эффективное снижение поверхностного натяжения наблюдается при концентрации 0,03–0,07 %, за счёт сильной адсорбции на границе раздела фаз. Несмотря на высокую эффективность отличается повышенной экологической токсичностью, что ограничивает его применение в составах, контактирующих с окружающей средой.

- Лауретсульфат натрия – анионное ПАВ с выраженными моющими и пенообразующими свойствами. Благодаря высокой поверхностной активности быстро снижает поверхностное натяжение растворов. Максимальная эффективность достигается при концентрации 0,05–0,1 %, при этом происходит быстрое смачивание поверхности и улучшение впитывания в пористые материалы [15, 16].

- Децилглюкозид – мягкое неионогенное ПАВ природного происхождения, обладающее хорошими смачивающими свойствами и высокой биоразлагаемостью [17]. Обеспечивает эффективное снижение поверхностного натяжения в концентрации 0,07–0,12 %, особенно в комбинации с другими ПАВ. Может использоваться в составе экологических пропиток без существенного вреда для древесины.

Цель настоящей работы заключалась в проведении сравнительного исследования влияния поверхностно-активных веществ – кокамидопропил бетаина, ОП-7, лауретсульфата натрия и децилглюкозида – на эффективность огнезащитной пропитки древесины раствором на основе фосфата аммония и тетрабората натрия, с последующей оптимизацией содержания ПАВ. В рамках исследования также проводилось определение смачиваемости огнезащитных растворов и измерение величины капиллярного впитывания.

**Экспериментальная часть.** В качестве добавок, обеспечивающих улучшение смачиваемости древесины огнезащитными растворами, в работе использовались следующие поверхностно-активные вещества: кокамидопропил бетаина, октилфенол этоксилат (ОП-7), лауретсульфат натрия и децилглюкозид. В качестве антипиренов для повышения огнестойкости древесины в работе были использованы однозамещённый фосфат аммония (ГОСТ 3772-74) и тетраборат натрия (ГОСТ 8429-77). Рецептуры исследованных растворов представлены в табл. 1.

Водородный показатель полученных растворов определялся с помощью рН-метра марки Testo 206.

Плотность определялась пикнометрическим методом. Вязкость растворов определялась с помощью ротационного вискозиметра Гепплера, поверхностное натяжение на границе жидкость-газ определялось по методу Ребиндера [18], краевой угол смачивания – по методу сидячей капли, при этом в качестве подложки использовался фторопласт.

Для исследования кинетики капиллярного подъёма пропиточных растворов использовали образцы древесины сосны обыкновенной размером  $4 \times 10 \times 80$  мм. Образцы фиксировали вертикально в чашках Петри диаметром 90 мм с помощью пластмассовых зажимов, погружая нижний торец каждого образца на глубину  $6,0 \pm 0,5$  мм в строго отмеренный объём раствора (40 мл), уровень которого контролировали в течение эксперимента. Пропитку проводили в течение 24 часов при стабильной температуре  $25 \pm 1$  °С. Высоту подъёма фронта раствора в древесине измеряли с точностью  $\pm 0,05$  мм с помощью штангенциркуля через 1, 2, 4, 8 и 24 часа после начала пропитки, избегая извлечения образцов из раствора.

Огнезащитная эффективность растворов антипиренов с добавками ПАВ была определена следующим образом. Растворами пропитывали предварительно высушенные до постоянной массы образцы древесины сосны размерами  $85 \times 40 \times 20$ . Образцы помещались в пропиточную ванну и экспонировались в растворе в течение 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. Испытание огнестойкости обработанных образцов древесины проводили на установке огневая труба 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

$$P = \frac{(m_1 - m_2)100}{m_1},$$

где  $m_1$  – масса образца до испытания, г;  $m_2$  – масса образца после испытания, г;

Полученные результаты округляли до 0,1 %.

**Анализ результатов.** Результаты определения свойств исследуемых растворов представлены в табл. 1. Установлено, что добавление поверхностно-активных веществ во все исследованные составы существенно улучшало смачивающую способность водных и огнезащитных растворов. Поверхностное натяжение водных растворов снижалось на 26–47 % (от 72,0 дин/см в контроле до 38,3–53,0 дин/см), при этом наибольшее снижение наблюдалось для растворов, содержащих ОП-7 (43,2 дин/см) и лауретсульфат натрия (38,3 дин/см). Краевой угол смачивания древесины уменьшался на 31–42 % (с 83,1° до 47,9–56,8°), минимальные значения были зафиксированы для ОП-7 (47,9°) и лауретсульфата натрия (49,8°). В огнезащитных составах добавле-

ние ПАВ также снижало краевой угол на 25–39 % (с 77,2° до 47,2–57,0°), что подтверждает их роль в повышении адгезии.

При переходе от водных растворов к огнезащитным составам скорость капиллярной пропитки древесины существенно снижалась, что может быть обусловлено совокупным влиянием нескольких факторов. Более высокая плотность и вязкость огнезащитных растворов увеличивают гидродинамическое сопротивление движению жидкости по капиллярам, замедляя процесс впитывания. Дополнительно в процессе пропитки возможно частичное закупоривание пор древесины кристаллами солей, что снижает проницаемость структуры и ограничивает глубину проникновения состава.

Изучение динамики капиллярного впитывания (рис. 1) показало, что в водных растворах наибольшую глубину проникновения за 24 ч обеспечивали ОП-7 и лауретсульфат натрия (70,7–71,0 мм против 65,3 мм в контрольном опыте). ОП-7 продемонстрировал максимальную начальную скорость впитывания (66,0 мм за 1 ч), что на 49 % превышало контроль. В огнезащитных составах лауретсульфат натрия (0,15 %) обеспечивал четырёхкратное увеличение скорости пропитки за 1 ч (31,0 мм против 7,7 мм в контроле), однако достигал плато уже к 4–8 ч (35,0–36,3 мм). Децилглюкозид (0,012 %) способствовал линейному росту глубины впитывания до 33,0 мм за 24 ч (+ 77 % к контролю). Кокаמידопропил бетаин (0,031 %) обеспечивал умеренную глубину проникновения (27,3 мм), но проявлял синергетический эффект в сочетании с антипиренами.

Все изученные ПАВ улучшали огнестойкость обработанной древесины, снижая потерю массы после испытаний на 9–19 % (с 20,8 % до 16,8–18,9 %). Наибольшая эффективность отмечена для кокаמידопропил бетаина (потеря массы образцами обработанной древесины – 16,8 %), что, вероятно, связано с синергией катионной формы вещества с фосфатом аммония при относительно низком pH (4,8). Децилглюкозид и лауретсульфат натрия показали сопоставимое снижение потери массы (до 18,4–18,5 %) при различной кинетике пропитки.

Примечательно, что после завершения эксперимента и последующей сушки образцов древесины уровень

капиллярного подъёма растворов антипиренов визуализировался в виде ярко выраженной полосы на их поверхности (рис. 2). Данный эффект свидетельствует о том, что структура древесины в процессе пропитки фактически функционировала как природная хроматографическая колонка, обеспечивая селективное распределение и фиксацию компонентов раствора по высоте образца.

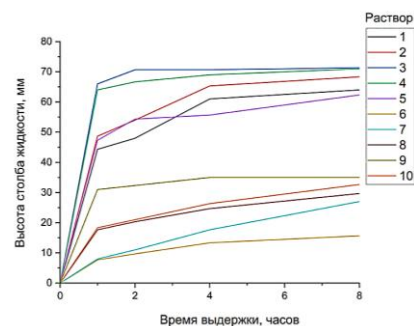


Рис. 1. Динамика капиллярного впитывания исследованных растворов

Анализ данных выявил обратную зависимость между краевым углом смачивания и скоростью капиллярной пропитки: минимальные углы смачивания (ОП-7, лауретсульфат натрия) соответствовали максимальным начальным скоростям впитывания. Ограничение глубины проникновения для лауретсульфата натрия в солевых растворах (35–36 мм) может быть связано с закупоркой пор древесины мицеллами или кристаллами минеральных солей.

С практической точки зрения, для глубокой пропитки целесообразно применение децилглюкозида (0,012 %), отличающегося экологичностью и стабильным увеличением глубины впитывания (+77 % к контролю). Для быстрой поверхностной обработки предпочтителен лауретсульфат натрия (0,15 %), обеспечивающий максимальную скорость начальной пропитки. Для достижения наибольшей огнестойкости оптимальным является кокаמידопропил бетаин (0,031 %), снижающий потерю массы на 19 %. ОП-7, несмотря на высокую эффективность, не может быть рекомендован в качестве универсального ПАВ в связи с экологической токсичностью.

Таблица 1. Состав исследованных растворов

№	Содержание компонента в р-ре, мас. %			Использованный ПАВ	Конц. ПАВ, % (от массы. р-ра)
	Фосфат аммония однозамещенный	Тетраборат натрия	Вода		
1	–	–	100,00	–	–
2			100,00	Кокаמידопропил бетаин	0,03099
3			100,00	ОП-7 (октилфенол этоксилят)	0,07544
4			100,00	Лауретсульфат натрия	0,15166
5			100,00	Децилглюкозид	0,01226
6	16,32	2,04	81,64	–	–
7				Кокаמידопропил бетаин	0,03099
8				ОП-7 (октилфенол этоксилят)	0,07544
9				Лауретсульфат натрия	0,15166
10				Децилглюкозид	0,01226

Таблица 2. Результаты определения свойств исследованных растворов

№ опыта	pH	Плотность р-ра, г/см <sup>3</sup>	Динамическая вязкость р-ра, Па·с	Поверхностное натяжение ( $\sigma$ ), дин/см	Краевой угол смачивания, °	Высота капиллярного впитывания за 24 часа, мм	Потеря массы образцами древесины после испытаний на огнестойкость, %
1	5,8	0,997	$8,9 \cdot 10^{-4}$	72,0	83,1	65,3	28,2
2	5,9	0,998	$8,9 \cdot 10^{-4}$	53,0	56,3	67,3	–
3	6,3	0,999	$8,9 \cdot 10^{-4}$	43,2	47,9	70,7	–
4	5,7	0,998	$8,9 \cdot 10^{-4}$	38,3	49,8	71,0	–
5	6,0	1,101	$8,8 \cdot 10^{-4}$	40,1	56,8	62,3	–
6	4,9	1,100	$9,4 \cdot 10^{-4}$	–	77,2	18,7	20,8
7	4,8	1,101	$9,3 \cdot 10^{-4}$	–	56,1	27,3	16,8
8	4,8	1,101	$9,3 \cdot 10^{-4}$	–	47,2	32,0	18,9
9	4,8	1,099	$9,2 \cdot 10^{-4}$	–	52,9	36,3	18,5
10	4,8	0,997	$9,1 \cdot 10^{-4}$	–	57,0	33,0	18,4

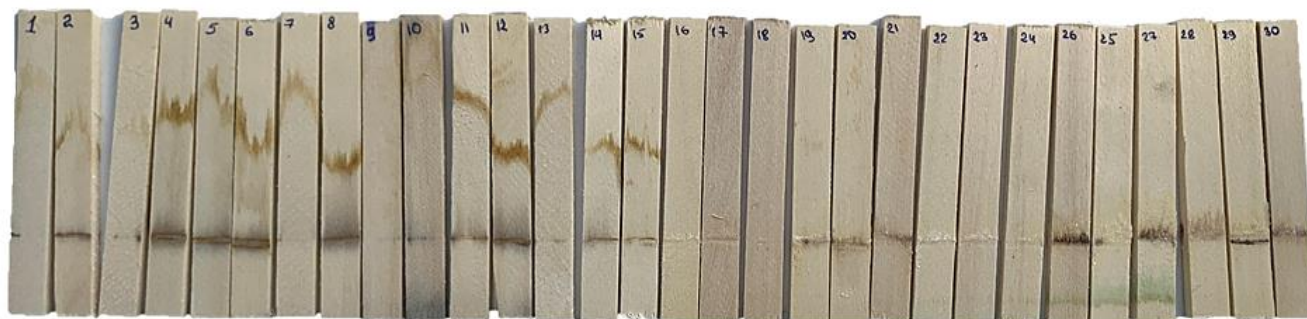


Рис. 2. Высушенные образцы древесины после определения капиллярного впитывания времени выдержки в растворе

**Закключение.** В ходе проведённого исследования установлено, что введение поверхностно-активных веществ в огнезащитные составы на основе фосфата аммония и тетрабората натрия позволяет существенно улучшить их смачивающую способность и повысить эффективность пропитки древесины. Наибольшее снижение поверхностного натяжения и краевого угла смачивания обеспечивали ОП-7 и лауретсульфат натрия, что сопровождалось увеличением начальной скорости капиллярного впитывания. При этом переход от водных растворов к огнезащитным составам сопровождался заметным снижением скорости проникновения, что связано с повышенной плотностью и вязкостью растворов, а также возможным частичным закупориванием пор древесины кристаллами солей. Оптимальными в практическом отношении оказались разные ПАВ

для различных задач: децилглюкозид – для глубокой и равномерной пропитки, лауретсульфат натрия – для быстрой поверхностной обработки, кокамидопропил бетаин – для достижения максимальной огнестойкости. ОП-7, несмотря на высокую эффективность, не рекомендуется к использованию в качестве универсальной добавки ввиду экологической токсичности.

Полученные результаты демонстрируют перспективность целенаправленного подбора типа и концентрации ПАВ для управления как технологическими, так и эксплуатационными характеристиками огнезащитных пропиток древесины, а также указывают на необходимость дальнейших исследований влияния реологических свойств и солевого состава растворов на кинетику их впитывания.

#### 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, No. 10. – P. 50–55. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.102393.
- Nagrodzka M. Impregnation of the wood by flame retardants / M. Nagrodzka, D. Małozieć // Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. – 2011. – Vol. 23, No. 3. – P. 69–75.
- 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.
- 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, No. 2. – P. 181–195.

7. Смирнов С.А. Исследование и разработка технологии огнегасящих материалов на основе фосфатов аммония : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.01 / С. А. Смирнов. – Иваново, 2011. – 167 с.
8. Scharrel B. Effectiveness of Amine Salts as Synergists in Ammonium Phosphate-Filled Wood Plastics Composite / B. Scharrel, N. Blumstein // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2009. – Vol. 48, No. 13. – P. 6057-6064.
9. Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions / E. Lublóy, D.T. Mészáros, L.G. Takas [et al.] // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2023. – 148 (1). – DOI 10.1007/s10973-023-12050-2.
10. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение / К.Р. Ланге ; К.Р. Ланге ; науч. ред. Л.П. Зайченко ; пер. с англ. [Н. Зорина]. – Санкт-Петербург : Профессия, 2007. – 239 с. – (HANSER). – ISBN 5-93913-068-2.
11. ПАВ различного типа в составе технологических жидкостей, применяемых в процессах нефте- и газодобычи / М.А. Силин, Л.А. Магадова, Л.Ф. Давлетшина [и др.] // *Нефтепромышленное дело*. – 2010. – № 10. – С. 22–24.
12. Исследование эффективности комплексных огнезащитных пропиточных составов для древесины / М.А. Красильникова, А.А. Баев, М.Н. Тухбатулин [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. – 2025. – № 2(66). – С. 115–122. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-115-122.
13. Mizerski A. Properties of Foaming Concentrates Containing Mixtures of Sodium Dodecyl Sulfate and Cocamidopropyl Betaine / A. Mizerski, M. Langner // *Bezpieczeństwo i Technika Pozarnicza*. – 2008. – Vol. 10, No. 2. – P. 57-66.
14. Поверхностно-активные свойства оксипропилированных алкилфенолов / В.З. Кузьмин, И.И. Сафарова, Т.М. Прокудина [и др.] // *Журнал прикладной химии*. – 2007. – Т. 80, № 5. – С. 778.
15. Измерение поверхностного натяжения коллоидных растворов / Р.Н. Таипова, И.В. Габдрахманов, Р.Н. Сибгатуллина, В.М. Дедешин // *Инновационные научные исследования: Теория, методология, практика : сборник статей XVII Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч., Пенза, 27 мая 2019 года. Том Часть 1*. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 27-30.
16. Paria S. Effect of cationic surfactant on the adsorption characteristics of anionic surfactant on cellulose surface / S. Paria, C. Manohar, K. Khilar // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2004. – Vol. 232. – DOI 10.1016/j.colsurfa.2003.10.016.
17. Holmberg K. Natural surfactants / K. Holmberg // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. – 2001. – Vol. 6. – P. 148–159. – DOI 6. 148-159. 10.1016/S1359-0294(01)00074-7.
18. Korenko M. Measurement of Interfacial Tension in Liquid-Liquid High-Temperature Systems / M. Korenko, F. Šimko // *Journal of Chemical and Engineering Data*. – DOI 55. 10.1021/je1004752.
- coatings / Yu. Tsapko, A. Tsapko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 3, No. 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 Pozarnicza*. – 2011. – Vol. 23, No. 3. – P. 69–75.
5. Travkin A.V. Methods of protecting wooden structures from external influences to increase their service life in industrial, civil buildings and structures / A.V. Travkin // *Naukosphere*. – 2020. – No. 1. – P. 26–29. – DOI 10.5281/zenodo.3634703.
6. 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, No. 2. – P. 181–195.
7. 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.
8. Scharrel B. Effectiveness of Amine Salts as Synergists in Ammonium Phosphate-Filled Wood Plastics Composite / B. Scharrel, N. Blumstein // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2009. – Vol. 48, No. 13. – P. 6057–6064.
9. Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions / E. Lublóy, D.T. Mészáros, L.G. Takas [et al.] // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2023. – 148 (1). – DOI 10.1007/s10973-023-12050-2.
10. Lange K.R. Surface-active substances: synthesis, properties, analysis, application / K.R. Lange; K.R. Lange; scientific editor L.P. Zaychenko; trans. from English [N. Zorina]. – St. Petersburg: Profession, 2007. – 239 p. – (HANSER). – ISBN 5-93913-068-2.
11. Surfactants of various types in the composition of process fluids used in oil and gas production processes / M.A. Silin, L.A. Magadova, L.F. Davletshina [et al.] // *Oilfield Engineering*. – 2010. – No. 10. – P. 22–24.
12. Study of the efficiency of complex fire-retardant impregnating compositions for wood / M.A. Krasilnikova, A.A. Baev, M.N. Tuxhatulin [et al.] // *Systems. Methods. Technologies*. – 2025. – No. 2(66). – P. 115–122. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-115-122.
13. Mizerski A. Properties of Foaming Concentrates Containing Mixtures of Sodium Dodecyl Sulfate and Cocamidopropyl Betaine / A. Mizerski, M. Langner // *Bezpieczeństwo i Technika Pozarnicza*. – 2008. – Vol. 10, No. 2. – P. 57–66.
14. Surface-active properties of ethoxylated alkylphenols / V.Z. Kuzmin, I.I. Safarova, T.M. Prokudina [et al.] // *Journal of Applied Chemistry*. – 2007. – Vol. 80, No. 5. – P. 778.
15. Measurement of surface tension of colloidal solutions / R.N. Taipova, I.V. Gabdrakhmanov, R.N. Sibgatullina, V.M. Dedeshin // *Innovative scientific research: Theory, methodology, practice: collection of articles of the XVII International scientific and practical conference.: in 2 parts, Penza, May 27, 2019. Volume Part 1*. – Penza : "Science and Education" (IP Gulyaev G.Yu.), 2019. – P. 27–30.
16. Paria S. Effect of cationic surfactant on the adsorption characteristics of anionic surfactant on cellulose surface / S. Paria, C. Manohar, K. Khilar // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2004. – Vol. 232. – DOI 10.1016/j.colsurfa.2003.10.016.
17. Holmberg K. Natural surfactants / K. Holmberg // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. – 2001. – Vol. 6. – P. 148–159. – DOI 6. 148-159. 10.1016/S1359-0294(01)00074-7.
18. Korenko M. Measurement of Interfacial Tension in Liquid-Liquid High-Temperature Systems / M. Korenko, F. Šimko // *Journal of Chemical and Engineering Data*. – DOI 55. 10.1021/je1004752.

## References

1. Aseeva R.M. Combustion and fire hazard of wood / R.M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov // *Fire and explosion safety*. – 2012. – Vol. 21, No. 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. – No. 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