

UDC 691.11
IRSTI 66.29.19
RESEARCH ARTICLE

DEVELOPMENT OF A LIQUID GLASS COMPOSITION TO PROTECT WOOD FROM FIRE

B.V. Kim , E.B. Kurmanbekova , A.K. Sambetbayeva* 

International Educational Corporation, 050028, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *This article discusses the process of developing a liquid glass composition designed to protect wood from fire. The main attention is paid to the selection of components such as sodium liquid glass as a binding agent, silica as a filler and a foaming agent to improve the properties of the coating. These components are chosen for their ability to form a protective layer, which swells when heated, significantly increasing the flame retardant properties of the material. The research methods included a detailed analysis of the constituent components of the flame retardant composition and experimental testing of its effectiveness. Laboratory tests were carried out, including the preparation of wood samples, their processing with the developed composition and the subsequent study of their behavior under the influence of high temperatures. The results show that the flame retardant coating effectively protects wood and belongs to the first group in terms of flame retardant effectiveness, being the highest indicator among similar materials. It is recommended to use this composition in a single-layer design to reduce the flammability of wooden structures as effectively as possible. The technological efficiency of the new composition is ensured due to the minimum number of components used and the availability of high-quality raw materials.*

Keywords: *flame retardant composition, liquid glass, foaming agent, silica, wood*

***Corresponding author**
Aigul Sambetbayeva, e-mail: aiguldo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-05>

Received 16 January 2024; Revised 23 February 2024; Accepted 01 April 2024.

ӘОЖ 691.11
ҒТАМР 66.29.19
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

АҒАШТЫ ӨРТТЕН ҚОРҒАУ ҮШІН СҰЙЫҚ ШЫНЫ КОМПОЗИЦИЯСЫН ЖАСАУ

Б.В. Ким , Э.Б. Күрманбекова , А.К. Самбетбаева* 

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы, 050028, Қазақстан

Андатпа. Бұл мақалада ағашты өрттен қорғауға арналған сұйық шыны құрамын жасау процесі қарастырылады. Байланыстырушы агент ретінде натрий сұйық әйнегі, толтырғыш ретінде микро кремний диоксиді және жабынның қасиеттерін жақсарту үшін көбіктендіргіш сияқты компоненттерді таңдауға баса назар аударылады. Бұл компоненттер қызған кезде ісінетін, материалдың отқа төзімді қасиеттерін едәуір арттыратын қорғаныс қабатын қалыптастыру қабілеті үшін таңдалады. Зерттеу әдістері отқа төзімді құрамның құрамдас бөліктерін егжей-тегжейлі талдауды және оның тиімділігін эксперименттік сынауды қамтыды. Ағаш үлгілерін дайындауды, оларды әзірленген құраммен өңдеуді және жоғары температураның әсерінен олардың мінез-құлқын кейіннен зерттеуді қамтитын зертханалық сынақтар жүргізілді. Нәтижелер отқа төзімді жабынның ағашты тиімді қорғайтынын және отқа төзімді тиімділігі бойынша бірінші топқа жататынын көрсетеді, бұл ұқсас материалдар арасындағы ең жоғары көрсеткіш. Бұл композицияны ағаш конструкциялардың жанғыштығын барынша тиімді азайту үшін бір қабатты дизайнда қолдану ұсынылады. Жаңа композицияның технологиялық тиімділігі қолданылатын компоненттердің минималды санына және жоғары сапалы шикізаттың болуына байланысты қамтамасыз етіледі.

Түйін сөздер: отқа төзімді композиция, сұйық шыны, көбіктендіргіш, микро кремний диоксиді, ағаш

*Автор-корреспондент

Айгуль Самбетбаева, e-mail: aigultdo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-05>

Алынды 16 қаңтар 2024; Қайта қаралды 23 ақпан 2024; Қабылданды 01 сәуір 2024.

УДК 691.11
МРНТИ 66.29.19
НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

РАЗРАБОТКА ЖИДКОСТЕКЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ ОТ ВОЗГОРАНИЯ

Б.В. Ким , Э.Б. Құрманбекова , А.К. Самбетбаева* 

Международная образовательная корпорация, Алматы, 050028, Казахстан

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс разработки жидкостеклянной композиции, предназначенной для защиты древесины от возгорания. Основное внимание уделено выбору компонентов, таких как натриевое жидкое стекло в качестве связующего агента, микрокремнезем в качестве наполнителя и пенообразователь для улучшения свойств покрытия. Эти компоненты выбраны за их способность формировать защитный слой, который при нагревании вспучивается, значительно повышая огнезащитные свойства материала. Методы исследования включали подробный анализ составляющих компонентов огнезащитной композиции и экспериментальное тестирование её эффективности. Были проведены лабораторные испытания, включающие подготовку образцов древесины, их обработку разработанной композицией и последующее изучение их поведения под воздействием высоких температур. Результаты показывают, что огнезащитное покрытие эффективно защищает древесину и относится к первой группе по огнезащитной эффективности, являясь наивысшим показателем среди аналогичных материалов. Рекомендуется применение данного состава в однослойном исполнении для максимально эффективного снижения горючести деревянных конструкций. Технологическая эффективность новой композиции обеспечиваются благодаря минимальному количеству используемых компонентов и доступности сырья высокого качества.

Ключевые слова: огнезащитная композиция, жидкое стекло, пенообразователь, микрокремнезем, древесина

*Автор-корреспондент
Айгуль Самбетбаева, e-mail: aigultdo@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-05>

Поступило 16 января 2024; Пересмотрено 23 февраля 2024; Принято 01 апреля 2024.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС / ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

В последние годы внимание к защите древесины от возгорания значительно возросло, учитывая увеличение использования деревянных конструкций в строительстве и мебельной промышленности. Исследования показывают, что жидкое стекло, модифицированное определенными добавками, может формировать на поверхности древесины термостойкий защитный слой, эффективно препятствующий распространению пламени (Abdrakhimov, 2020). Однако существующие данные еще недостаточно полны в части определения оптимальных составов и методов их применения, а также в аспекте взаимодействия компонентов с различными типами древесины.

Жидкостекольные покрытия обладают рядом преимуществ, включая низкую стоимость и возможность нанесения на различные поверхности, что делает их привлекательными для широкого использования. Огнестойкость материалов становится критическим фактором в обеспечении безопасности зданий и сооружений. Одним из перспективных направлений в этой области является разработка жидкостекольных композиций, которые могут значительно улучшить огнезащитные свойства древесины. Несмотря на разнообразие существующих решений, многие из них либо не обеспечивают достаточной эффективности, либо имеют значительные экологические недостатки.

Современные исследования показывают, что жидкое стекло, модифицированное определенными добавками, может формировать на поверхности древесины термостойкий защитный слой, эффективно препятствующий распространению пламени. Однако существующие данные еще недостаточно полны в части определения оптимальных составов и методов их применения, а также в аспекте взаимодействия компонентов с различными типами древесины.

Цель данного исследования заключается в разработке жидкостекольной композиции с добавлением специфических силикатных и неорганических компонентов для повышения огнестойкости древесины. Мы предполагаем, что оптимизация состава жидкого стекла с добавлением микрокремнезема, боратов и других огнеупорных добавок позволит создать высокоэффективное огнезащитное покрытие. В рамках работы будет проведен анализ эффективности новой композиции в лабораторных условиях и пригодности к промышленному применению.

Исследование вносит вклад в научную область защиты древесины от возгорания, предлагая экологически безопасное и экономически выгодное решение, способное повысить безопасность деревянных конструкций. Результаты данной работы могут быть полезны как для научного сообщества, так и для промышленности, изменяя практику применения огнезащитных покрытий и способствуя развитию новых стандартов в области строительства и производства строительных материалов.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В этом разделе представлен обзор существующих исследований, касающихся разработки огнезащитных композиций на основе жидкого стекла (Leonovich & Sheloumov, 2002; Dudnichenko, 2019; Efimov, 2019). Эта область исследований имеет длительную историю, начиная с первых применений жидкого стекла в качестве связующего компонента и развиваясь до современных технологий производства огнезащитных покрытий. Клеящая способность жидкого стекла в 3-5 раз выше, чем у цементов (Toturbiev, 1988).

Исходя из доступной литературы (Gazizov et al., 2020; Khafizov et al., 2018) жидкое стекло (ЖС) долгое время используется в огнеупорной промышленности благодаря своим выдающимся адгезивным свойствам и термостойкости. ЖС представляет собой водные щелочные растворы силикатов, которые в зависимости от состава могут выдерживать высокие температуры и образовывать пенообразное покрытие при нагревании, тем самым увеличивая огнезащитные характеристики материала (Stenina, 2019; Abdrakhimov, 2020).

Существуют различные точки зрения на применение жидкого стекла, особенно касающиеся его экологической безопасности и экономической выгоды. Использование

жидкого стекла требует добавления различных наполнителей и модификаторов, что может влиять на окружающую среду и стоимость конечного продукта (Solovyova, 2013; Leonovich, 2019; Sharafutdinov et al., 2020). В предыдущих исследованиях были использованы различные подходы для улучшения свойств огнезащитных покрытий на основе ЖС, включая добавление низкоплотностных наполнителей и антипиренов, а также регулирование вязкости смеси для оптимизации свойств покрытия.

Несмотря на множество исследований, существует недостаточное понимание долговременной стабильности и жизнеспособности огнезащитных покрытий на основе ЖС. Также мало внимания уделяется экологическим и экономическим аспектам при выборе компонентов (Ustinov & Pitukhin, 2018; Gazizov et al., 2024). Эти пробелы критически важны, поскольку они могут значительно влиять на практическое применение и распространение огнезащитных технологий на основе ЖС.

Работа (Goldstein, 2001) представляет собой одно из первых систематических изучений влияния жидких силикатов на поведение древесины при воздействии огня. Результаты исследования демонстрируют увеличение времени устойчивости древесины к огню до 30%. Авторы обсуждают различные стратегии модификации жидкого стекла для улучшения его защитных свойств, включая добавление микрокремнезема и других наноматериалов (Ivanov & Petrova, 2015).

В статье (Kheradmandi & Modarres, 2018) представлены результаты сравнительного анализа различных огнезащитных обработок древесины, подчеркивая преимущества силикатных составов перед традиционными методами на основе фосфатов. Исследование фокусируется на экологических аспектах использования жидкостекольных композиций, обсуждая их биоразлагаемость и воздействие на окружающую среду (Kumar, 2020).

Исследование направлено на устранение упомянутых пробелов путем разработки новых рецептур огнезащитных составов, которые будут не только эффективными и долговечными, но и экономически выгодными и экологически безопасными. Это исследование позволит лучше понять взаимодействие различных компонентов в жидкостекольных покрытиях и определить оптимальные условия их использования для защиты древесины и других материалов от огня.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследований использовали образцы из прямослойной воздушно-сухой древесины сосны с влажностью 8–15 % и плотностью от 400 до 550 г/м³ в виде прямоугольных брусков с поперечным сечением 30 × 60 мм и длиной вдоль волокон 150 мм, согласно СТ РК 615-1-2011 (Рисунок 1). Образцы перед испытаниями высушивались до постоянной массы при температуре 40- 45°C.



Рисунок 1 – Образцы древесины (материалы авторов).

Для получения огнезащитного покрытия в качестве связующего использовали натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078-2021).

Основные характеристики жидкого стекла представлены в [Таблице 1](#).

Таблица 1

Основные характеристики жидкого стекла (ГОСТ 13078-2021)

Плотность, кг/м ³	Вязкостьна ВЗ-4, с	Массовая доля оксидов, %					Силикатный модуль, М _с	Твердый остаток, %
		SiO ₂	R ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Na ₂ O		
1,36	25-30	74,18	0,25	0,05	0,06	25,46	2,93	50

В качестве модификатора предлагается использовать микрокремнезем, который образуется в процессе выплавки сплавов кремния (ферросилиция). Некоторая часть монооксида кремния, после окисления и конденсации, образует мелкий продукт в виде ультрадисперсного порошка, частицы которого являются частички аморфного кремнезема со средней площадью удельной поверхностью более 20000 см²/г. Частицы микрокремнезема имеют гладкую поверхность и сферическую форму. Средний размер частиц составляет 0,1-0,2 микрон. Фактически микрокремнезем состоит из рыхлых агломератов кремнезема с очень низкой насыпной плотностью. В исследованиях был использован микрокремнезем ТОО «Тау-Кен Темир» г. Караганда ([Рисунок 2](#)).



Рисунок 2 – Микрокремнезем, (100-200 нм) (материалы авторов).

В целях улучшения взаимодействия древесины с нанесенным покрытием используется пенообразователь «ПО-6ТС» в количестве 1%. Пенообразователь «ПО-6ТС» – биоразлагаемый пенообразователь целевого назначения с повышенной огнетушащей способностью. Пенообразователь «ПО-6ТС» представляет собой состав водного раствора поверхностно-активных веществ, углеводов и стабилизаторов. Эти компоненты способствуют быстрому формированию пены, которая эффективно изолирует горючую поверхность от кислорода воздуха, тем самым предотвращая распространение огня.

Для определения огнезащитной эффективности применяли следующие средства измерения, испытательное оборудование и материалы:

- установка «Керамическая труба»; весы (класс точности III) ([Рисунок 3](#));
- секундомер (класс точности 2);
- газ бытовой; фольга алюминиевая толщиной от 0,014 до 0,018 мм марки ФГ; -
- вытяжной шкаф с принудительной вентиляцией;
- емкость для пропитки образцов древесины; установка (устройство) для нанесения ОС методом распыления;

- кисти, шпатели; эксикатор;
- цинк азотнокислый 6-водный ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$).

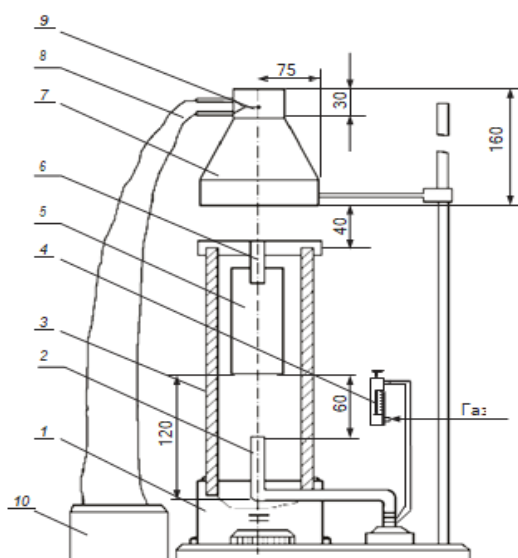


Рисунок 3 - Установка «Керамическая труба»: 1 - подставка; 2 - газовая горелка; 3 - керамический короб; 4 - ротаметр; 5 - образец; 6 - держатель образца; 7- зонт; 8 - термоэлектрический преобразователь; 9 - верхний патрубок зонта; 10 - автоматический потенциометр (СТ РК 615-1-2011)

Образцы древесины перед нанесением огнезащитного состава (ОС) кондиционировали в эксикаторе с насыщенным раствором цинка азотнокислого 6-водного при температуре 23 ± 5 °С. Кондиционирование прекращали, когда изменение массы образцов между двумя последующими взвешиваниями, проведенными через 24 часа, составляла не более 0,2 г. На кондиционированные образцы древесины со всех сторон наносили слой испытываемого ОС и высушивали.

Расход состава после каждой обработки определяли весовым методом по разнице масс образца до и после нанесения ОС. Взвешивание обработанных пропиточными составами образцов осуществляется после прекращения стекания с поверхности невпитавшегося раствора. С торца образца остатки раствора удаляли фильтровальной бумагой. Общее поглощение R , кг/м³, определяли по формуле:

$$R = \frac{m_1 - m_2}{V} * 100\% \quad (1)$$

где m_1 - масса образца после пропитки, кг;
 m_2 - масса образца перед пропиткой, кг;
 V - объем образца, м³.

Испытания проводили на 10 образцах в вытяжном шкафу с принудительной вентиляцией, скорость движения воздуха не более 5 м/с.

Внутренние стенки керамического короба выкладывали алюминиевой фольгой блестящей стороной внутрь, для чего из фольги вырезали полосы шириной, равной внутренней ширине стенки короба (рис.4). Полосы поочередно в три слоя закладывали внутрь керамического короба, разглаживали по внутренним стенкам и загибали по торцам на наружную поверхность керамического короба. Фольгу меняли после сжигания каждых трех образцов.

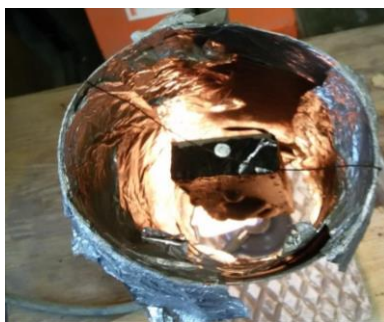


Рисунок 4 – Огневые испытания исследуемых материалов (материалы авторов)

Для эксперимента керамический короб сначала ставили горизонтально и поджигали под ним газовую горелку, настраивая пламя высотой от 15 до 25 см. Затем короб возвращали в вертикальное положение и размещали над ним зонт в рабочем положении. Регулировали поток газа таким образом, чтобы температура, измеряемая термоэлектрическим преобразователем, в течение 5 минут была равна (200 ± 5) °С, после чего фиксировали значение величины расхода газа в л/ч по показаниям ротаметра. Зонт отводили, испытываемый образец, закрепленный в держателе, опускали в керамический короб, одновременно включали секундомер и возвращали зонт в рабочее положение.

Образцы древесины держали в пламени горелки в течение 2 минут. Расход газа в процессе испытания был постоянным. Через 2 минуты подачу газа в горелку прекращали, образец оставляли в приборе для остывания. После остывания (температура отходящих газов в верхнем патрубке зонты равна комнатной) оставшуюся часть образца извлекали из керамического короба и взвешивали.

Потерю массы испытанного образца P , %, вычисляли по формуле:

$$P = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\% \quad (2)$$

где m_1 – масса образца до испытания, г;

m_2 – масса образца после испытания, г

Согласно **СТ РК 615-1-2011**: при потере массы не более 9 % для ОС устанавливают I группу огнезащитной эффективности. При потере массы более 9 %, но не более 25% для ОС устанавливают II группу огнезащитной эффективности. При потере массы более 25 % считают, что данный состав не обеспечивает огнезащиту древесины и не является огнезащитным.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для выявления эффективности работы огнестойких наполнителей в составе с жидким стеклом проведены экспериментальные исследования. В **Таблице 2** представлены разработанные составы жидкостекольных композиций для защиты древесины от возгорания.

Таблица 2

Составы жидкостекольных композиций для защиты древесины от возгорания.

Состав	Состав сырьевой смеси, масс., %	
	1	2
Натриевое жидкое стекло	89	87
ПАВ «ПО-6ТС»	1,0	1,0
Микрокремнезем	10	12

На основе эксперимента были определены значения потери массы древесных образцов, обработанных огнезащитными составами в один и два слоя, результаты которых представлены в **Таблице 3**.

Таблица 3

Показатели потери массы образцов древесины

Номер образца	Потеря массы образца, %			
	Состав 1		Состав 2	
	1 слой	2 слоя	1 слой	2 слоя
001	1,51	1,71	2,37	1,28
002	1,64	1,56	5,38	1,18
003	1,65	1,67	2,81	1,09
004	1,53	1,54	4,11	1,18
005	1,62	1,67	4,33	1,16
006	1,48	1,47	2,67	1,18
007	1,72	1,69	2,84	1,16
008	1,63	1,60	3,17	1,28
009	1,64	1,57	5,23	1,22
010	1,49	1,51	4,27	1,20
Р _{ср} , %	1,591	1,599	3,718	1,193

Из анализа данных о потере массы образцов с различными составами огнезащитных покрытий видно, что нанесение двух слоев улучшает защитные свойства обоих составов, подтверждая повышение их эффективности при увеличении числа слоев. Состав 1 демонстрирует меньшую потерю массы как при однослойном, так и при двухслойном нанесении по сравнению с составом 2, что свидетельствует о его высокой эффективности в защите материала.

В отличие от этого, состав 2 при однослойном нанесении показывает значительно большую потерю массы, что может быть связано с более высоким содержанием микрокремнезема. Предполагается, что это увеличивает пористость материала, что, в свою очередь, приводит к большей потере массы при нагреве. Однако при двухслойном нанесении потеря массы значительно снижается, подчеркивая важность правильного выбора толщины покрытия. На основании представленных данных состав 1 является более предпочтительным выбором для использования в качестве огнезащитного покрытия, так как он обеспечивает более низкую потерю массы и более стабильную защиту независимо от количества нанесенных слоев. Это делает его более эффективным и надежным вариантом для обеспечения огнезащиты древесины.

5 ВЫВОДЫ

В данном исследовании была разработана инновационная огнезащитная композиция на основе жидкого стекла, предназначенная для защиты древесины. Целью исследования было создание покрытия, которое эффективно защищает древесину от возгорания, обеспечивая при этом высокие эксплуатационные характеристики и минимальное воздействие на окружающую среду. В качестве основы был выбран жидкостекольный раствор, который модифицировался добавками для улучшения термостойкости и адгезии.

В данном исследовании была разработана инновационная огнезащитная композиция на основе жидкого стекла, предназначенная для защиты древесины. Результаты экспериментальных исследований, проведенные согласно стандартизированным методикам, показали, что разработанная композиция формирует высококачественное покрытие, которое эффективно вспучивается при воздействии высоких температур и демонстрирует превосходную адгезию к различным древесным поверхностям. Она отнесена к первой группе

по огнезащитной эффективности, что является наивысшим показателем среди подобных материалов. Рекомендуется применение данного состава в однослойном исполнении для максимально эффективного снижения горючести деревянных конструкций. Технологическая эффективность новой композиции обеспечиваются благодаря минимальному количеству используемых компонентов и доступности сырья высокого качества.

Планируется продолжение исследований для дальнейшего улучшения огнезащитных свойств жидкостекольных композиций, применяемых в строительстве. В заключение можно отметить, что результаты исследования явно демонстрируют значительные перспективы использования разработанной композиции в улучшении огнезащиты деревянных конструкций, что открывает пути для дальнейших разработок в этом направлении. Высокая эффективность, простота применения и доступность делают эту инновационную композицию перспективным решением для широкого спектра строительных и промышленных задач. Продолжение исследований в этом направлении откроет новые пути для развития технологий защиты древесины и повышения безопасности зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abdrakhimov, V. Z.** (2020). Application of anthracite flotation enrichment waste in production of porous aggregate based on liquid-glass [Primenenie othodov flotacionnogo obogascheniya antracita v proizvodstve poristogo zapolnitelya na osnove jidkogo stekla]. *Compositions/ Construction and Geotechnics*, 11(1), 92-101. (In Russ.).
2. **Kheradmandi, N., & Modarres, A.** (2018). Precision of back-calculation analysis and independent parameters-based models in estimating the pavement layers modulus-Field and experimental study. *Construction and Building Materials*, 171, 598-610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.211>
3. **Dudnichenko, I. I.** (2019). The application of kremnezema filler to improve the fire resistance of wood [Primenenie napolnitelya kremnezema dlya povisheniya ognestoikosti drevesini]. *Woodworking: Technologies, Equipment, Management of the XXI Century: Proceedings of the XIV International Eurasian Symposium, September 17-20, 2019, Yekaterinburg*, 107-109. Retrieved from: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/8751> (In Russ.).
4. **Efimov, V. N.** (2019). Impregnations as protection of wood from fire [Propitki kak zaschita drevesini ot ognya]. *Scientific Creativity of Youth – to the Forest Complex of Russia: Materials of the XV All-Russian Scientific and Technical Conference. Ural Forest Technopark, Yekaterinburg*, 80-83. Retrieved from: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/8221> (In Russ.).
5. **Gazizov, A. M., Kuznetsova, O. V., Sharafutdinov, A. A., & Shaimuhametova, K. M.** (2020). Improvement of fire retardant properties of wood materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 919, 062014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/919/6/062014>
6. **Gazizov, A. M., Gorokhovskiy, A. G., Shishkina, E. E., & Myalitsin, A. V.** (2024). Protection of wood from fire with the use of special compositions [Zaschita drevesini ot ognya s ispolzovaniem specialnih sostavov]. *Forests of Russia and Agriculture in Them*, (1)88, 159-164. <https://doi.org/10.51318/FRET.2023.88.1.016>. (In Russ.).
7. **Goldstein, A.** (2001). Fire retardant properties of silicate compounds. *Fire Safety Journal*, 36, 123-132. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(01\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00011-3).
8. **Ivanov, S., & Petrova, T.** (2015). Modern approaches to wood fire protection with silicate-based compounds. *Advances in Materials Science*, 47-56. <https://doi.org/10.17277/amt.2015.02.pp.024-030>.
9. **Khafizov, F. S., Gazizov, A. M., Khafizov, I. F., & Sharafutdinov, A. M.** (2018). Evaluation

- of the mobile simulator for fire protection training. Materials of the Annual Scientific International Conference «Computer Systems, Applications and Software Engineering, CSASE 2018», Nizhniy Tagil, Russia, 2131. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-2131/paper6.pdf>.
10. **Kumar, R.** (2020). Eco-friendly fire retardant applications of silicate composites. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07619>.
 11. **Leonovich, A. A., & Sheloumov, A. V.** (2002). Reducing the fire hazard of wood materials, products and building structures [Snijenie požarnoi opasnosti drevesnih materialov_ izdelii i stroitelnih konstrukcii.]. St. Petersburg: Publishing House of SPbGPU. (In Russ.).
 12. **Leonovich, A. A.** (2019). Special purpose wood-based materials: [Drevesnie materiali specialnogo naznacheniya] A textbook. St. Petersburg: Publishing house "Lan". (In Russ.).
 13. **Review of flame retardants of building structures.** [Obzor ognezaschitnih sredstv stroitelnih konstrukcii] (2013). Retrieved from <http://www.tehnology-pro.ru/obzor-ognezashitnix-sredstv-stroitelnix-konstrukciie.html> (In Russ.).
 14. **Sharafutdinov, A. A., Khafizov, F. S., Khafizov, I. F., Krasnov, A. V., Akhmetfazizov, A. V., Zakirova, V. I., & Khafizova, A. N.** (2020). Development of a method for calculating fire and oil spills parameters. 28th Russian Conference on Mathematical Modelling in Natural Sciences, RuMoNaS 2019: Materials of AIP Conference Proceedings, 2216, 070004. <https://doi.org/10.1063/5.0003843>
 15. **Solovyova, M. E.** (2013). The influence of a fire-resistant coating on increasing the fire resistance limit of wooden building structures [Vliyanie ognezaschitnogo pokritiya na povishenie predela ognestoikosti derevyannih stroitelnih konstrukcii]. *Electronic Scientific Journal "Oil and Gas Business"*, (1). Retrieved from <http://www.ogbus.ru>. (In Russ.).
 16. **Stenina, E. I.** (2019). The influence of flame retardants on the strength of wood [Vliyanie antipirenov na prochnost drevesini]. *Forest Science in the Implementation of the Concept of the Ural Engineering School: Socio-Economic and Environmental Problems of the Forest Sector of the Economy: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference, Yekaterinburg*, 73-77. Retrieved from <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/8503> (In Russ.).
 17. **Toturbiev, B. D.** (1988). Building materials based on silicate-sodium compositions [Stroitelnie materiali na osnove silikatno_natrievih kompozicii]. M.: Stroyizdat. (In Russ.).
 18. **Ustinov, A. S., & Pitukhin, E. A.** (2018). Modeling of the formation of a stable phase of a composite material liquid glass — graphite microparticles [Modelirovanie obrazovaniya stabilnoi fazi kompozitsionnogo materiala jidkogo stekla — mikrochastic grafita]. *Bulletin of the International Academy of Cold*, (3), 80-86. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-3-80-86> (In Russ.).