

Научная статья

УДК 614.849; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-67-78

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПРОПИТОЧНЫХ СОСТАВОВ ДЛЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Федотов Илья Олегович;**

✉ **Сивенков Андрей Борисович.**

**Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия.**

**Нагановский Юрий Кузьмич.**

**Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт  
противопожарной обороны МЧС России, Москва, Россия**

✉ [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрены результаты оценки огнезащитной эффективности различных антипиренов методом огневого воздействия по ГОСТ 53292–2009 и методами термического анализа (термогравиметрия, дифференциальная термогравиметрия, производный термический анализ). По результатам огневых испытаний установлено, что при расходе поверхностного нанесения огнезащитных составов от 350 до 550 кг/м<sup>2</sup> обеспечивается I или II группа огнезащитной эффективности (потеря массы от 8,67 до 25 %). Показано, что группа огнезащитной эффективности фактически не отражает характер и степень реализации механизма огнезащитного действия антипиренов, их способность оказывать влияние на особенности термических превращений древесины. Установлено, что вид антипирена, его химический компонентный состав и механизм огнезащитного действия в различной степени оказывают влияние на основные стадии термоокислительного разложения древесины. Полученные результаты могут использоваться для оценки эффективности огнезащиты в снижении интенсивности процесса обугливания и прогнозирования интенсивности тлеющего (беспламенного) горения древесины.

*Ключевые слова:* антипирены, огнезащитная эффективность, древесина, деревянные конструкции, огнестойкость, пожарная опасность, обугливание, окисление, беспламенное (тлеющее) горение, коксообразование, каталитическая дегидратация

**Для цитирования:** Федотов И.О., Сивенков А.Б., Нагановский Ю.К. Эффективность огнезащитных пропиточных составов для деревянных конструкций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 67–78. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-67-78.

Scientific article

## **THE EFFECTIVENESS OF FLAME RETARDANT IMPREGNATING COMPOUNDS FOR WOODEN STRUCTURES**

**Fedotov Ilya O.;**

✉ **Sivenkov Andrey B.**

**Academy of the State fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia.**

**Naganovsky Yuri K.**

**Russian order «Badge of Honor» research institute of fire defense of EMERCOM of Russia,  
Moscow, Russia**

✉ [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru)

*Abstract.* The article considers the results of evaluating the flame retardant effectiveness of various flame retardants by the method of fire exposure according to GOST 53292–2009 and by methods of thermal analysis (thermogravimetry, differential thermogravimetry, derivative thermal analysis). According to the results of fire tests, it was found that with the consumption

of surface application of flame retardants from 350 to 550 kg/m<sup>2</sup>, group I or II of flame retardant efficiency is provided (mass loss from 8,67 to 25 %). It is shown that the group of flame-retardant effectiveness does not actually reflect the nature and degree of realization of the mechanism of flame retardant action of flame retardants, their ability to influence the features of thermal transformations of wood. It has been established that the type of flame retardant, its chemical component composition and the mechanism of flame retardant action to varying degrees affect the main stages of thermal oxidative decomposition of wood. The results obtained can be used to evaluate the effectiveness of fire protection in reducing the intensity of the charring process and predicting the intensity of smoldering (flameless) combustion of wood.

*Keywords:* flame retardants, flame retardant efficiency, wood, wooden structures, fire resistance, fire hazard, charring, oxidation, flameless (smoldering) combustion, coke formation, catalytic dehydration

**For citation:** Fedotov I.O., Sivenkov A.B., Naganovsky Yu.K. The effectiveness of flame retardant impregnating compounds for wooden structures // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 3 (67). P. 67–78. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-67-78.

### Введение

В современное время во всем мире наблюдается возрастающий интерес к строительству зданий и сооружений с применением деревянных конструкций. Основным направлением обеспечения пожарной безопасности зданий и сооружений с применением строительных конструкций из древесины является соответствие требуемым пределам огнестойкости и классам пожарной опасности, которые могут достигаться с помощью применения различных видов и способов огнезащиты. В соответствии со ст. 52, 58 Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» предопределена важность применения огнезащитных средств для достижения требуемых показателей пожарной опасности и огнестойкости строительных конструкций, а также для исключения или снижения интенсивности образования опасных факторов пожара [1]. Несмотря на это, изучению возможности применения различных способов и видов огнезащиты для этих целей посвящено немногочисленное количество научных работ, например [2, 3].

Успешному внедрению огнезащитных технологий для обеспечения пожаробезопасности деревянных конструкций предшествовали многочисленные исследования с использованием пожарно-технических и физико-химических методов. Однако своеобразный исторический разрыв между методологией оценки эффективности огнезащиты для древесины и нормативно-техническими показателями применения огнезащиты для материалов и конструкций на основе древесины в полной мере пока восполнить не удастся. Исследования в данном случае носят адресный и в какой-то степени локальный характер в отношении конкретных огнезащитных средств без выяснения вопроса влияния химического компонентного состава огнезащиты, а также механизма огнезащитного действия на ключевые показатели пожарной опасности и огнестойкости деревянных конструкций. Несомненно, совершенствование методологии оценки эффективности огнезащитных средств для древесины и деревянных конструкций и поиск ключевых показателей эффективности огнезащиты является составной частью стратегически важного для отрасли строительства направления исследований. В этой связи авторам представляется важным выяснение влияния природы химических компонентов, входящих в состав рецептур различных огнезащитных пропиточных составов, с учетом механизма их огнезащитного действия на особенности термических превращений древесины, являющихся основой для прогнозной оценки показателей пожарной опасности и огнестойкости деревянных конструкций. В этом аспекте важнейшим является изучение процесса обугливания древесины, определяющего особенности поведения материалов и конструкций на основе древесины в условиях пожара. Толщина, свойства и структура образующегося обугленного слоя, в том числе с позиции применения различного рода антипиренов, играют при этом решающую роль.

### Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования рассматривались авторские рецептуры огнезащитных пропиточных составов с различными механизмами действия, способствующие снижению интенсивности прогрева и скорости обугливания древесины [4]. Исследуемые огнезащитные пропиточные составы представляют собой составы, включающие в себя классические фосфор-, азот- и борсодержащие антипирены. Концентрация рабочих компонентов в водном растворе была установлена не менее 29,5 % с учетом растворимости химических реагентов. При формировании рецептур огнезащитных составов исходили, прежде всего, из необходимости изучения антипиренов, имеющих различную химическую природу и механизмы огнезащитного действия.

На сегодняшний день определение группы огнезащитной эффективности средств огнезащиты для древесины и материалов на ее основе осуществляется по ГОСТ Р 53292–2009 «Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа» [5]. Сущность метода заключается в установлении потери массы образцом древесины с огнезащитой в результате огневого воздействия продолжительностью 2 мин. Критерием оценки эффективности огнезащиты является потеря массы образцов при испытании.

В табл. 1 представлены характеристики исследуемых огнезащитных пропиточных составов, их компонентный состав и преобладающий механизм огнезащитного действия.

Таблица 1

#### Характеристики исследуемых огнезащитных составов

№ образца	Наименование образца, химический компонентный состав антипиренов	Преобладающий механизм огнезащитного действия
1	Нативная древесина (древесина сосны, плотность 450–500 кг/м <sup>3</sup> , влажность 6–8 %)	–
2	Древесина сосны с антипиреном на основе солей аммония фосфорной кислоты (20 %), газообразователей (5 %), фторида натрия (3 %), поверхностно-активных веществ и ароматических полифункциональных компонентов (1,5 %)	Каталитическая дегидратация
3	Древесина сосны с антипиреном на основе полифосфата аммония (30 %), газообразователей (10 %), ароматических полифункциональных компонентов (0,5 %) и термопластичного полимера (10 %)	Каталитическая дегидратация
4	Древесина сосны с антипиреном на основе полифосфата аммония (20 %), газообразователей (10 %), комплекса многоатомных спиртов (20 %) и ароматических полифункциональных компонентов (0,5 %)	Коксообразование
5	Древесина сосны с антипиреном на основе солей аммония фосфорной кислоты (20 %), низкомолекулярных углеводов (10 %) и многоатомных спиртов (10 %)	Коксообразование
6	Древесина сосны с антипиреном на основе солей аммония фосфорной кислоты (20 %), газообразователей (20 %), многоатомных спиртов (19,5) и борсодержащих соединений (0,5 %)	Коксообразование

Исследования особенностей термоокислительного разложения образцов древесины нативной и в присутствии антипиренов проводились с использованием автоматизированной модульной термоаналитической системы (ТАС) «Du Pont 9900», включающей в свой состав термовесы ТГА-951. Для подготовки образцов с поверхности древесины (размер образца 25x27 см) были отобраны тонкослойные срезы (размеры срезов составляют 4x4 мм и глубиной 1 мм). Навеска образцов изменялась в пределах 5,0–8,0 мг.

### Результаты и их обсуждение

В настоящей работе важным представляется оценка эффективности рассматриваемых огнезащитных пропиточных составов, имеющих различный химический состав и механизмы огнезащитного действия, в рамках стандартных огневых испытаний, а также установление их способности оказывать влияние на характер термических превращений древесины, представленных на рис. 1.



Рис. 1. Фото образцов древесины после испытаний по ГОСТ Р 53292–2009: а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6 (номера образцов представлены в табл. 1)

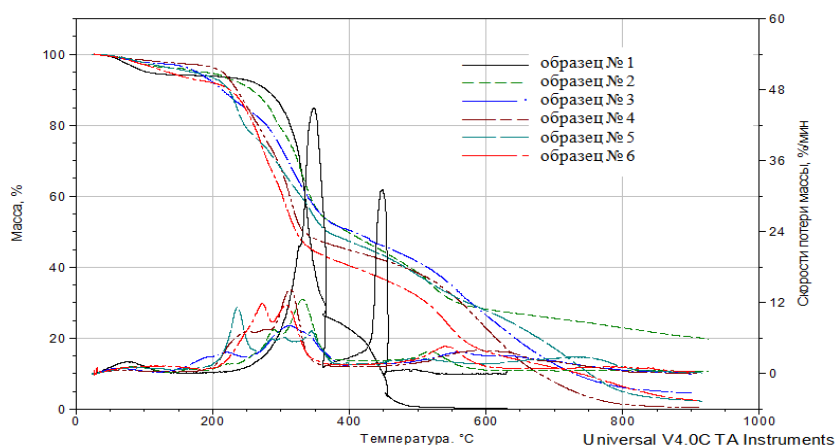
Результаты огневых испытаний рассматриваемых огнезащитных пропиточных составов по методике, изложенной в ГОСТ Р 53293–2009 [5], представлены в табл. 2.

**Результаты огневых испытаний огнезащитных пропиточных составов по ГОСТ Р 53292–2009 [5]**

№ образца	Расход поверхностного нанесения состава, г/м <sup>2</sup>	Группа огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53292–2009 (потеря массы, %)
1	–	Потеря массы 84,9 %
2	350	II группа огнезащитной эффективности (25,0 %)
3	400	Не обладает эффективностью (36,0 %)
4	450	I группа огнезащитной эффективности (8,67 %)
5	550	II группа огнезащитной эффективности (18,8 %)
6	500	II группа огнезащитной эффективности (19,0 %)

Полученные результаты по определению группы огнезащитной эффективности показали, что антипирены, имеющие преобладающий механизм каталитической дегидратации, относятся ко второй группе эффективности при соответствующем расходе. При этом потеря массы вне зависимости от содержания различных химических компонентов в исследуемых составах имеет сопоставимые значения. Несмотря на это, некоторые пропиточные составы, содержащие комплекс кислотосодержащих соединений и вспомогательных компонентов, образующие при огневом воздействии на защищаемой поверхности вспененный коксообразный слой толщиной до 15 мм, отличаются в значительной степени друг от друга по потере массы в пределах от 8,67 % (I группа огнезащитной эффективности) до 19,0 % (II группа огнезащитной эффективности). Очевидно, что группа огнезащитной эффективности фактически не отражает характер и степень реализации механизма огнезащитного действия антипиренов, их способность оказывать влияние на особенности термических превращений древесины.

Более информативными в данном случае являются методы термического анализа, позволяющие понять сущность протекающих физико-химических процессов при изучении эффективности различных видов пропиточных составов (антипиренов) для огнезащиты древесины. На рис. 2 представлены термогравиметрическая (ТГ) и дифференциальная термогравиметрическая (ДТГ) кривые образцов нативной древесины и древесины с огнезащитными пропиточными составами (атмосфера – воздух, скорость нагревания 20 °С/мин).



**Рис. 2. ТГ (1) и ДТГ (2) кривые образцов нативной древесины и древесины с огнезащитными пропиточными составами (атмосфера – воздух, скорость нагревания 20 °С/мин)**

В табл. 3 сведены результаты термического анализа нативной древесины и древесины в присутствии антипиренов (атмосфера – воздух, скорость нагревания 20 °С/мин).

Таблица 3

**Результаты термического анализа нативной древесины и древесины с различными антипиренами (атмосфера – воздух, скорость нагревания 20 °С/мин)**

№ образца	Температурные интервалы деструкции, °С	Потеря массы в интервале, %	ДТГ максимумы, $t_{max}$ , °С/А, %/ мин
1	30–154	5,9	76/2,0
	154–361	67,6	348/45,0
	361–475	25,3	449/30,5
2	30–138	3,77	83/1,2
	138–410	47,3	288/8,1 331/13,3
	410–900	28,5	516/3,9
3	30–118	2,54	62/0,9
	118–248	12,5	222/3,6
	248–397	34,3	312/8,2
	397–900	46,0	562/3,6
4	30–136	2,3	72/0,6
	136–382	51,9	250/7,1 313/15,0
	382–900	45,4	591/3,96
5	30–140	3,9	85/1,0
	140–264	19,7	236/11,2
	264–389	28,2	286/5,4 344/7,2
	389–591	19,6	499/2,5
	591–900	26,1	738/2,8
6	30–185	7,48	113/1,3
	185–400	52,1	273/11,8 309/11,6
	400–652	26,7	540/4,6
	652–900	10,96	780/1,2

Для древесины нативной можно разделить основные этапы термоокислительного разложения на три характерных температурных интервала деструкции:

– первый интервал (до 154 °С) характеризуется удалением влаги в пределах 5,0–6,0 % по массе;

– второй интервал (180–450 °С) является активным этапом термодеструкции древесины сосны, который приводит к потере массы в пределах 50–80 %. Максимальная скорость разложения достигается при температуре 348 °С;

– на третьем интервале (выше 361 °С) наблюдается стадия окисления угольного остатка с потерей массы 25,3 %. Пиковое значение достигается при температуре 449 °С с амплитудой 30,45 %/мин.

Действие пропиточного состава (обр. № 2, табл. 1), содержащего соли аммония фосфорной кислоты, характеризуется в большей степени классическим механизмом каталитической дегидратации. Схема реакций взаимодействия целлюлозы и ортофосфорной кислоты представлена на рис. 3 [6].

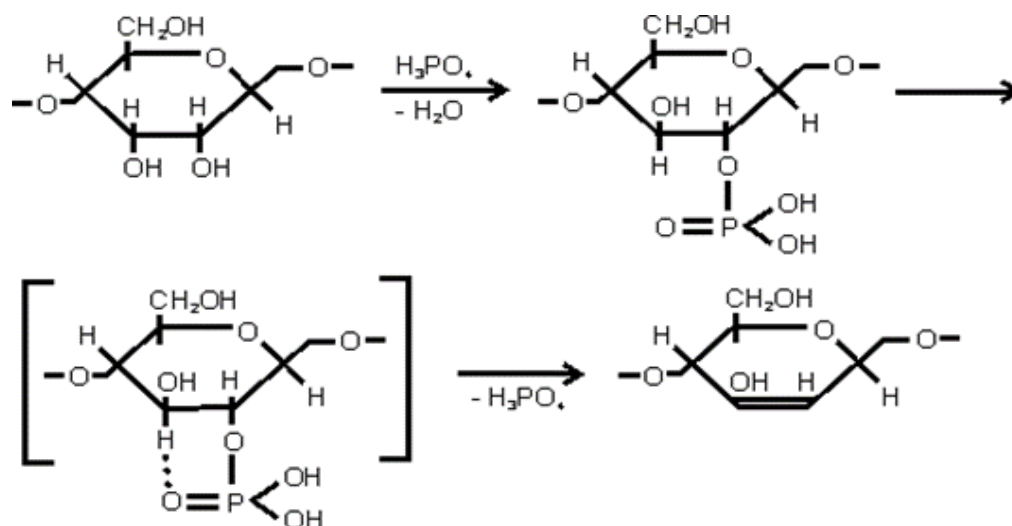


Рис. 3. Схема реакций взаимодействия целлюлозы и ортофосфорной кислоты

При повышении температуры до 180 °С высвобождается фосфорная кислота, которая способствует процессу дегидратации целлюлозы, а также выделяется аммиак, действующий по вышеуказанному механизму. При повышении температуры до 260 °С ортофосфорная кислота преобразуется в другие кислоты и воду. Ранее полученные результаты термогравиметрического анализа в отношении древесины с аналогичными пропиточными составами свидетельствуют о том, что при температуре более 200 °С потеря массы древесины в присутствии фосфорсодержащих антипиренов усиливается и достигает максимальной скорости разложения при температуре 262 °С [7].

Использование фосфорсодержащих соединений в составе антипирена приводит к уменьшению окислительного эффекта угольного остатка, что проявляется в снижении скорости потери массы образца с 30,45 %/мин для нативной древесины до 3,92 %/мин. Содержание в угольном слое элементов фосфора обеспечивает снижение его окислительной способности, поскольку данный элемент является эффективным депрессантом тлеющего (беспламенного) горения [8, 9]. Максимальная температура окисления угольного слоя в данном случае повышается с 415 °С до 516 °С (табл. 2). Снижение пожарной опасности древесины несомненно достигается участием антипиренов в процессе формирования угольного слоя. Известно, что выход карбонизованного остатка при конечной температуре нагрева 500 °С у нативной древесины, древесины модифицированной ортофосфорной и пирофосфорной кислотами равен соответственно: 18 мас.%, 46 мас.% и 54 мас.% [7, 10].

В случае применения антипирена с повышенным содержанием полифосфата аммония (обр. № 3, табл. 1) на кривых ТГ и ДТГ наблюдаются изменения, связанные с протеканием процесса дегидратации при более высоких температурах от 200 до 220 °С по сравнению с антипиреном, содержащим соли аммония фосфорной кислоты (температура начала процесса межмолекулярной дегидратации составляет 180 °С). При этом наблюдается смещение участка максимальной скорости разложения до температуры 312 °С, а значение амплитуды снижается до значения 8,21 %/мин (табл. 2, обр. № 3). Характерное пиковое значение скорости разложения образца при температуре 222 °С свидетельствует о термическом разложении термопластичного полимера, имеющего температуру разложения 220 °С, без видимого протекания процесса межмолекулярной дегидратации, поскольку использование полифосфата аммония предполагает появление орто- и пирофосфатных фрагментов при более высоких температурах от 280–300 °С [11]. По сути, в данном случае имеет место десинхронизация действия различных компонентов на основном температурном участке от 200 до 300 °С. Интересно отметить, что при стандартной оценке огнезащитной эффективности данного антипирена был получен результат с потерей массы образца 36 %



(состав не обладает огнезащитным эффектом). Тем не менее наличие в составе антипирена фосфорсодержащих соединений позволяет снизить интенсивность окислительных реакций угольного слоя (температура, соответствующая максимальной скорости окисления, составляет 562 °С при скорости потери массы до 6,53 %/мин), что также может свидетельствовать о снижении интенсификации процесса тлеющего (беспламенного) горения.

Высокая согласованность взаимодействия компонентов при достижении огнезащитного эффекта установлена в отношении комплексного антипирена, содержащего полифосфат аммония, газообразователи, комплекс многоатомных спиртов и ароматические полифункциональные компоненты (обр. № 4, табл. 1). Используемый комплекс многоатомных спиртов, способных при воздействии температуры к естественной дегидратации, способствует снижению активности процесса термодеструкции образца на достаточно обширном температурном участке от 200 до 240–280 °С, далее идет высвобождение кислотного катализатора с усилением процесса межмолекулярной дегидратации. Именно в этот температурный период происходит интенсивное коксообразование огнезащитной системы. Вместе с этим также протекает процесс дегидратации в отношении углеводного комплекса древесины с максимальной температурой разложения на основном участке 313 °С (амплитуда 15 %/мин). Использование комплексного антипирена, включающего полифосфат аммония, многоатомные спирты, газообразователи и ароматический сшивающий компонент, позволяет повысить максимальную температуру окисления угольного остатка до 591 °С со скоростью окисления 3,96 %/мин. Применение подобных антипиренов может позиционироваться для снижения пожарной опасности и повышения огнестойкости деревянных конструкций.

При изучении процесса разложения древесины в присутствии антипирена, имеющего в своем составе смесь солей аммония фосфорной кислоты и соединений, являющихся источниками углерода (низкомолекулярные углеводы и многоатомные спирты), было обнаружено, что величина потери массы (измеренная на кривой ТГ) и скорость потери массы (измеренная на кривой ДТГ) зависят от температуры сложным образом, что можно оценить по количеству явно выраженных экстремальных участков температуры (табл. 2, обр. № 5). При совместном разложении древесины с коксообразующим антипиреном наблюдается появление на кривых ДТГ пиковых амплитудных значений при температурах 236, 286 и 344 °С. Общие потери массы на основном участке достигают 47,94 %. При 236 °С происходит дегидратация и коксование низкомолекулярных углеводов в присутствии кислот фосфора, образующихся в результате термических превращений солей аммония фосфорной кислоты. В последующем в температурном диапазоне от 236 до 344 °С часть высвободившейся при 180 °С фосфорной кислоты расходуется на процессы дегидратации многоатомных спиртов, олиго- и высокомолекулярных компонентов углеводного комплекса древесины.

Несомненный интерес может представлять двухстадийный реакционно-окислительный процесс на кривых ДТГ, который имеет максимальные пиковые значения при температурах 499 и 738 °С (табл. 2, обр. № 5). По всей видимости, этот процесс вызван наложением процессов окисления угольного остатка непосредственно древесины и кокса, который сформирован с участием различных углеродсодержащих соединений на различных температурных стадиях под влиянием кислотного фосфорсодержащего катализатора. По результатам проведения стандартных огневых испытаний (табл. 2) можно сделать вывод о том, что установленный эффект коксообразования на защищаемой поверхности древесины является недостаточным для получения высокого огнезащитного эффекта. Потеря массы образцом при испытаниях составляет 18,8 %, что свидетельствует об интенсивном обугливание древесины даже в условиях процесса коксообразования компонентов антипирена. Несмотря на это, реакционно-окислительная активность древесного угля в присутствии антипирена на экстремальном участке кривой ДТГ снижается в 12 раз (до 2,5 %/мин) по сравнению с угольным остатком нативной древесины (30,5 %/мин). В данном случае,



по мнению авторов, проявление эффекта огнезащиты подобных антипиренов в полной мере должно проявиться при более продолжительном огневом воздействии.

Для повышения устойчивости угольного субстрата к окислению в состав коксообразующих антипиренов были введены соединения бора, которые при высокотемпературном воздействии образуют термостойкие стеклообразные пленки. В данном случае положительный эффект в снижении окислительной способности древесного угля установлен в отношении коксообразующего антипирена (обр. № 6, табл. 1). Эффект действия соединений бора связан со снижением доступа окислителя к поверхности древесного угольного слоя при высоких температурах (табл. 2, обр. № 6). На первом этапе при нагревании до 185 °С происходит удаление влаги из древесины и влагосодержащих компонентов антипирена, включая борные соединения, которые теряют воду при температурах более 70 °С. В результате этого процесса происходит потеря массы в размере 7,47 %. В диапазоне температур 150 °С и 200 °С наблюдается эндотермический эффект, который связан с распадом борных соединений, таких как борная кислота, на метаборную кислоту при 150 °С и тетраборную кислоту при 160 °С. Это благоприятно сказывается на процессе дегидратации углеводных компонентов. После этого антипирен выступает в роли типичного замедлителя горения, катализируя процесс дегидратации. При 180 °С происходит высвобождение кислотного катализатора, что интенсифицирует процессы дегидратации. Несколько пиковых значений процесса термоокислительного разложения связаны с избирательным взаимодействием ортофосфорной кислоты, высвобождаемой при этой температуре, с многоатомными спиртами и компонентами лигноуглеводного комплекса в диапазоне температур от 200 до 400 °С.

Уменьшение способности угольного слоя к окислению происходит вследствие образования защитной стеклообразной пленки оксида бора (в процессе термических превращений при высоких температурах образуется борный ангидрид  $B_2O_3$ , который плавится при 577 °С), а также наличия в угольном субстрате элементов антипирена – фосфора. Фактически происходит смещение процесса окисления угольного остатка в сторону более высоких температур на 100 °С по сравнению с нативной древесиной. Кроме этого, следует отметить, что соединения бора способствуют повышению механической прочности образовавшегося угольного (коксообразного) слоя [12].

### Основные выводы

По результатам исследования методами прямого огневого воздействия на образцы древесины с огнезащитными пропиточными составами и методами термического анализа показано значительное влияние компонентного химического состава и механизма огнезащитного действия на рассматриваемые характеристики эффективности огнезащиты. По результатам стандартных огневых испытаний установлено, что при расходе поверхностного нанесения огнезащитных составов от 350 до 550 кг/м<sup>2</sup> обеспечивается I или II группа огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53292–2009 (потеря массы от 8,67 до 25 %). Также в отношении огнезащитного состава, имеющего в рецептуре компоненты, механизм огнезащиты которых реализуется в условиях десинхронизации, получен результат с потерей массы 36 % (не обладающий огнезащитной эффективностью). По сути, действие всех предложенных огнезащитных пропиточных составов направлено на снижение горючести, что находит отражение в результатах потери массы образцом при кратковременном огневом испытании. Однако при более продолжительном огневом воздействии на образцы древесины или деревянных конструкций с огнезащитой наблюдаются значительные расхождения в способности антипиренов оказывать влияние на характер процесса обугливания, снижение интенсивности беспламенного (глюющего) горения, а также величины тепловыделения в условиях термоокислительного разложения исследуемых образцов. Ранее полученные результаты [4] в отношении древесины в присутствии антипиренов позволили определить

диапазон значений скоростей обугливания от 0,55 до 0,95 мм/мин, что фактически предопределяет актуальность настоящих и последующих исследований.

Анализ результатов термогравиметрического исследования показывает, что на характер термических превращений древесины оказывает значительное влияние химический компонентный состав замедлителей горения и механизм их огнезащитного действия. Использование для огнезащиты древесины фосфорных кислот предопределяет протекание классического механизма межмолекулярной дегидратации со смещением основной стадии термоокислительного разложения древесины до температуры 300 °С и выше. В случае применения ортофосфорной кислоты известным является снижение температурного порога основной деструктивной стадии древесины до температуры 215 °С. Применение комплексных антипиренов, содержащих различные кислотодонорные и другие функциональные компоненты, приводит к сложным физико-химическим превращениям древесины в присутствии, например, многоатомных спиртов и полигидратных соединений, дегидратирующих при повышении температуры [12]. Данные процессы приводят к снижению термической активности древесного комплекса с заметным снижением скорости потери массы (в три и более раза) на различных температурных участках, а также потере окислительной способности образующегося угольного остатка.

### Список литературы

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. Доступ из информ.-правового портала «Гарант».
2. Повышение огнестойкости деревянных конструкций путем применения огнебиозащитных пропиточных составов / О.В. Арцыбашева [и др.] // Полимерные материалы пониженной горючести: материалы VIII Междунар. конф. Алматы: Казахский нац. ун-т им. Аль-Фараби, 2017. С. 248–251.
3. Нигматуллина Д.М. Снижение пожарной опасности деревянных конструкций способом их глубокой пропитки огнебиозащитными составами: дис. ... канд. техн. наук. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2017. 201 с.
4. Fedotov I.O., Khasanova G.Sh., Sivenkov A.B. The efficiency of various fire protectants for wooden structures // Eurasian chemico-technological journal. 2022. № 1 (24). С. 33–41.
5. ГОСТ Р 53293–2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. URL: docs.cntd.ru/document/1200071912 (дата обращения: 09.06.2023).
6. Модифицирование древесины фосфиновыми кислотами и их эфирами / Е.Н. Покровская [и др.] // Химия древесины. 1987. № 6. С. 79–82.
7. Сивенков А.Б. Снижение пожарной опасности материалов на основе целлюлозы: дис. ... канд. техн. наук. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2002. 197 с.
8. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981. 280 с.
9. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Снижение горючести полимерных материалов. М.: Знание, 1981. 64 с.
10. Берлин А.А., Сивенков А.Б., Хасанова Г.Ш. Химические основы снижения пожарной опасности материалов на основе целлюлозы // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19. № 2. С. 65–77.
11. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. 2010. № 8. С. 11–58.
12. Fire hazard and fire resistance of wooden structures / A.B. Sivenkov [et al.] // Springer nature switzerland AG. 2023. XVI. 269 p.

## References

1. Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti: Feder. zakon Ros. Federacii ot 22 iyulya 2008 g. № 123-FZ. Dostup iz inform.-pravovogo portala «Garant».
2. Povyshenie ognestojkosti derevyannyh konstrukcij putem primeneniya ognebiozashchitnyh propitochnyh sostavov / O.V. Arcybasheva [i dr.] // Polimernye materialy ponizhennoj goryuchesti: materialy VIII Mezhdunar. konf. Almaty: Kazahskij nac. un-t im. Al'-Farabi, 2017. S. 248–251.
3. Nigmatullina D.M. Snizhenie pozharnoj opasnosti derevyannyh konstrukcij sposobom ih glubokoj propitki ognebiozashchitnymi sostavami: dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2017. 201 s.
4. Fedotov I.O., Khasanova G.Sh., Sivenkov A.B. The efficiency of various fire protectants for wooden structures // Eurasian chemico-technological journal. 2022. № 1 (24). P. 33–41.
5. GOST R 53293–2009. Pozharnaya opasnost' veshchestv i materialov. Materialy, veshchestva i sredstva ognezashchity. Identifikaciya metodami termicheskogo analiza. URL: docs.cntd.ru/document/1200071912 (data obrashcheniya: 09.06.2023).
6. Modificirovanie drevesiny fosfinovymi kislotami i ih efirami / E.N. Pokrovskaya [i dr.] // Himiya drevesiny. 1987. № 6. S. 79–82.
7. Sivenkov A.B. Snizhenie pozharnoj opasnosti materialov na osnove cellyulozy: dis. ... kand. tekhn. nauk. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2002. 197 s.
8. Aseeva P.M., Zaikov G.E. Gorenje polimernyh materialov. M.: Nauka, 1981. 280 s.
9. Aseeva P.M., Zaikov G.E. Snizhenie goryuchesti polimernyh materialov. M.: Znanie, 1981. 64 s.
10. Berlin A.A., Sivenkov A.B., Hasanova G.Sh. Himicheskie osnovy snizheniya pozharnoj opasnosti materialov na osnove cellyulozy // Gorenje i plazmohimiya. 2021. T. 19. № 2. S. 65–77.
11. Nenahov S.A., Pimenova V.P. Fiziko-himiya vspenivayushchihsya ognezashchitnyh pokrytij na osnove polifosfata ammoniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 2010. № 8. S. 11–58.
12. Fire hazard and fire resistance of wooden structures / A.B. Sivenkov [et al.] // Springer nature switzerland AG. 2023. XVI. 269 p.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 22.05.2023; одобрена после рецензирования: 22.08.2023;  
принята к публикации: 05.09.2023

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 22.05.2023; approved after review: 22.08.2023;  
accepted for publication: 05.09.2023

*Информация об авторах:*

**Федотов Илья Олегович**, адъюнкт Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), e-mail: [ilafedotov367@gmail.com](mailto:ilafedotov367@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5076-3167>, SPIN-код: 9462-7756

**Сивенков Андрей Борисович**, профессор кафедры пожарной безопасности в строительстве в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты Академии ГПС МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), доктор технических наук, профессор, e-mail: [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru), ResearcherID: R-5518-2017, <https://orcid.org/0000-0003-3821-8606>, РИНЦ Author ID: 434522, SPIN-код: 1404-6956

**Нагановский Юрий Кузьмич**, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (143903, Московская обл., г. Балашиха, 12 мкр.), кандидат технических наук, e-mail: [reut11731@mail.ru](mailto:reut11731@mail.ru), Scopus Author ID: 6506689489, ResearcherID: 166916, <https://orcid.org/0000-0001-9739-9123>, РИНЦ Author ID: 43977865, SPIN-код: 9408-0656

*Information about the authors:*

**Fedotov Ilya O.**, adjunct of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), e-mail: [ilafedotov367@gmail.com](mailto:ilafedotov367@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5076-3167>, SPIN: 9462-7756

**Sivenkov Andrey B.**, professor of the department of fire safety in construction as part of the educational and scientific complex of fire safety of objects of protection of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Moscow, Boris Galushkin str., 4), doctor of technical sciences, professor, e-mail: [sivenkov01@mail.ru](mailto:sivenkov01@mail.ru), ResearcherID: R-5518-2017, <https://orcid.org/0000-0003-3821-8606>, RSCI Author ID: 434522, SPIN: 1404-6956

**Naganovsky Yuri K.**, leading researcher of Russian order «Badge of Honor» research institute of fire defense of EMERCOM of Russia (143903, Moscow region, Balashikha, 12 mkr.), candidate of technical sciences, e-mail: [reut11731@mail.ru](mailto:reut11731@mail.ru), Scopus Author ID: 6506689489, ResearcherID: 166916, <https://orcid.org/0000-0001-9739-9123>, RSCI Author ID: 43977865, SPIN: 9408-0656