

УДК 614.841.45

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СМЕСЯХ АНТИПИРЕНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ

Мельников Никита Олегович^{1,2}, Шугаева Арина Романовна¹, Монахов Антон Андреевич¹, Черепанов Евгений Александрович³

¹ РХТУ им. Д. И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

² Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В. А. Кучеренко, г. Москва, Российская Федерация

³ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается проблема снижения пожарной опасности древесины посредством возможного повышения огнезащитной эффективности защитных средств для древесины при комбинировании антипиренов, проявляющих синергизм или взаимное усиление свойств. Представлен обзор по известным смесям антипиренов, нашедшим широкое применение на практике. Методами термического анализа исследовано влияние моноаммонийфосфата, аммония тетраборнокислого 4-водного и их смеси в массовом соотношении 3:1 на термоокислительное разложение пропитанной древесины в зависимости от содержания химических веществ, определены кинетические параметры и огнезащитная эффективность по ГОСТ 30028.3–2022. Исследовано совместное действие антипиренов, и получены зависимости энергии активации основной стадии термоокислительного разложения пропитанной древесины от общего поглощения. Установлено, что для смеси антипиренов энергия активации процесса имеет наибольшие значения и возрастает с увеличением поглощения, а потеря массы уменьшается, температура максимума потери массы при этом сдвигается примерно на 70 °С в область более низких температур, что способствует более раннему образованию защитного коксового слоя на поверхности древесины. Огнезащитная эффективность в смеси взаимно усиливается и достигает I класса, по сравнению с индивидуальными антипиренами, в нее входящими. Экспериментально подтвержден синергетический эффект в смеси исследуемых антипиренов.

Ключевые слова: антипирен, огнезащитная эффективность, огнезащита древесины, термический анализ, кинетические параметры термического разложения, синергизм, синергетические эффекты

Для цитирования: Синергетические эффекты в смесях антипиренов для защиты древесины / Н. О. Мельников [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 77–87.

SYNERGISTIC EFFECTS IN FLAME RETARDANT MIXTURES FOR WOOD PROTECTION

Nikita O. Melnikov^{1,2}, Arina R. Shugaeva¹, Anton A. Monakhov¹, Evgeny A. Cherepanov³

¹ Mendeleev University, Moscow, Russian Federation

² Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko, Moscow, Russian Federation

³ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The article considers the problem of reducing the fire hazard of wood by means of a possible increase in the fire-retardant effectiveness of protective agents for wood when combining flame retardants that exhibit synergy or mutual enhancement of properties. An overview of well-known flame-retardant mixtures that have found wide application in practice is presented. The effect of monoammonium phosphate, ammonium tetraborate 4-aqueous and their mixtures in a 3:1 mass ratio on the thermal and oxidative decomposition of impregnated wood, depending on the content of chemicals, was studied by thermal analysis methods, kinetic parameters and fire-retardant effectiveness were determined according to GOST 30028.3-2022. The combined effect of flame retardants was investigated and the dependences of the activation energy of the main stage of thermal and oxidative decomposition of impregnated wood on the total absorption were obtained. It was found that for a mixture of flame retardants, the activation energy of the process has the highest values and increases with increasing absorption, and the mass loss decreases, while the temperature of the maximum mass loss shifts by about 70 °C to lower temperatures, which contributes to the earlier formation of a protective coke layer on the wood surface. The flame-retardant effectiveness in the mixture is mutually enhanced and reaches Class I, compared with the individual flame retardants included in it. The synergistic effect in the mixture of flame retardants studied has been experimentally confirmed.

Keywords: flame retardant, fire-retardant efficiency, fire protection of wood, thermal analysis, kinetic parameters synergism, synergistic effects

For citation: Synergistic effects in flame retardant mixtures for wood protection / N. O. Melnikov et al. // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 77–87.

Введение

На протяжении веков древесина остается одним из ключевых строительных материалов, поэтому до настоящего времени актуальной задачей является обеспечение защиты данного строительного материала при пожаре. Применение для этих целей пропиточных составов на основе различных антипиренов в практике нашло наибольшее распространение. Несмотря на огромное количество предлагаемых к применению готовых рецептур, изыскание новых высокоэффективных средств огнезащиты активно продолжается.

Поэтому изучению механизмов огнезащитного действия антипиренов и их влиянию на термическое разложение пропитанной древесины в последнее время уделяется большое внимание. Многочисленные работы [1–5], посвященные анализу наиболее известных и применяемых на практике веществ в качестве антипиренов, и попытки их систематизировать не выявили еще вполне апробированного принципа выбора антипиренов при разработке эффективных защитных средств. Высказываемые различными авторами предположения о влиянии индивидуальных антипиренов

на термическое разложение и огнезащитную эффективность носят иногда весьма противоречивый характер. Особенно это касается сочетанного (синергетического или антагонистического) действия, проявляемого в смесях антипиренов.

Синергетический эффект, или взаимное усиление свойств, достигается при комбинировании различных типов огнезащитных веществ, что позволяет существенно повысить их эффективность при защите древесины. Проявление синергизма и подтверждение этих явлений весьма актуально, так как дает возможность совершенствования, модернизации и удешевления рецептур средств огнезащиты. При этом надо учитывать, что при построении рецептур защитных средств вводимые в них вещества с целью придания антисептических свойств могут снижать огнезащитную эффективность и стимулировать процесс горения.

Применение некоторых антипиренов в комбинации друг с другом известно и применяется на практике достаточно давно. Так, например, известно, что борная кислота сама по себе не является антипиреном по отношению к древесине, но в смеси с бурой имеют огнезащитную эффективность. Огнебиозащитный препарат ББ-11 на их основе стандартизирован [6] и нашел широкое применение на практике. Проявляемые в смеси буры и борной кислоты синергетические эффекты, а также влияние их на термическое разложение древесины подробно изучены в работах [7–9].

Одним из наиболее распространенных пропиточных составов для поверхностной обработки древесины согласно [10] является состав МС, где в качестве антипиренов используется смесь аммония фосфорнокислого и аммония сернокислого в массовом

соотношении 4:1. При этом допускается использование диаммонийфосфата технического, диаммонийфосфата кормового или аммофоса.

Синергизм проявляют смеси диаммонийфосфата и карбамида. В работе [11] установлено, что огнезащитная эффективность при определенной комбинации антипиренов может взаимно усиливаться. Смесь диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 2:1 обладает наибольшей огнезащитной эффективностью, чем эти же смеси в соотношении 1:1 и 1:2 и индивидуальные антипирены. В работах [8, 9, 11] также подробно изучалось термическое разложение древесины, пропитанной этой смесью антипиренов.

В работе [12] показано, что смесь хлорида аммония и буры показывает синергию, что обеспечивало лучшие огнезащитные свойства по сравнению с использованием каждого из них по отдельности, а именно снижали скорость распространения пламени и время пламенного горения, а время воспламенения и выход несгораемого остатка увеличивались.

Настоящая работа посвящена исследованию синергетических эффектов в смеси азотфосфорсодержащих и азотборсодержащих антипиренов, проведению термического анализа пропитанной древесины и определению огнезащитной эффективности на примере моноаммонийфосфата и аммония тетрaborнокислого 4-водного.

Материалы и методы

Объектами исследования являются следующие антипирены и их смеси:

- моноаммонийфосфат $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ТУ 20.15.73-702-00209438-21);

- аммоний тетраборнокислый 4-водный $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ТУ 6-09-2654-78);
- моноаммонийфосфат и аммоний тетраборнокислый 4-водный в соотношении 3:1.

Исследования проводились на образцах воздушно-сухой древесины заболони сосны размером $15 \times 15 \times 6$ мм (последний размер соответствует направлению волокон) с влажностью 6–8 % и средней плотностью 450 кг/м^3 . Растворы антипиренов заданной концентрации готовили растворением в воде соответствующего количества вещества. Пропитку

образцов проводили согласно ГОСТ 30028.3–2022 [13] по методу «вакуум — атмосферное давление», обеспечивающему равномерное распределение веществ по всему объему образца, с начальным вакуумом не менее 0,09 МПа, продолжительностью 15 ± 1 мин и продолжительностью выдержки в растворе антипиренов при атмосферном давлении 30 ± 1 мин. После пропитки образцы сушили до постоянной массы.

Общее поглощение антипиренов в пропитанной древесине Q в кг/м^3 определяли согласно (1).

$$Q_1 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot c \cdot 10}{V_1}, \quad (1)$$

где:

m_2 — масса образца древесины после пропитки, г;

m_1 — масса образца древесины до пропитки, г;

c — заданная концентрация защитного средства, %;

V_1 — объем образца древесины, см^3 .

Равномерность распределения антипиренов в объеме древесины подтверждали методом сканирующей электронной микроскопии с использованием микроскопа JEOL 1610LV (JEOL, Япония) с энергодисперсионным спектрометром для электронно-зондового микроанализа

SSD X-Max Inca Energy (Oxford Instruments, Великобритания) (исследования проводились в ЦКП РХТУ им. Д. И. Менделеева). На рис. 1 представлено распределение фосфора в поперечном срезе образца после пропитки моноаммонийфосфатом и сушки древесины.



Рис. 1. Распределение фосфора (светлые точки) в поперечном срезе образца древесины при картировании на сканирующем электронном микроскопе

Fig. 1. Phosphorus distribution (light dots) in a cross-section of a wood sample when mapped on a scanning electron microscope

Для исследования термического разложения образцов древесины использовался дифференциально-термический анализ (ДТА), проводимый на дериватографе Q-1500 d системы F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey.

Условия проведения эксперимента: нагрев — 1 000 °С; скорость нагрева — 10 °С/мин; атмосфера — воздух; навеска (измельченная древесина) — 100 мг; тигли — корунд; образец сравнения — Al_2O_3 .

Кинетические параметры основной стадии термического разложения рассчитывали по ТГ- и ДТГ-кривым по методике, описанной в [11].

Огнезащитную эффективность определяли в соответствии с ГОСТ 30028.3–2009 [13].

Результаты и их обсуждение

Методами ДТА получены зависимости потери массы (ТГ-кривые) и скорости потери массы (ДТГ-кривые) от температуры как исходной непропитанной древесины, так и огнезащитной исследуемыми антипиренами и их смесью с различными общими поглощениями.

На рис. 2–4 представлены совмещенные ТГ- и ДТГ-кривые исходной древесины и образцов, пропитанных моноаммонийфосфатом, аммонием тетраборнокислым 4-водным и их смесью в массовом соотношении 3:1.

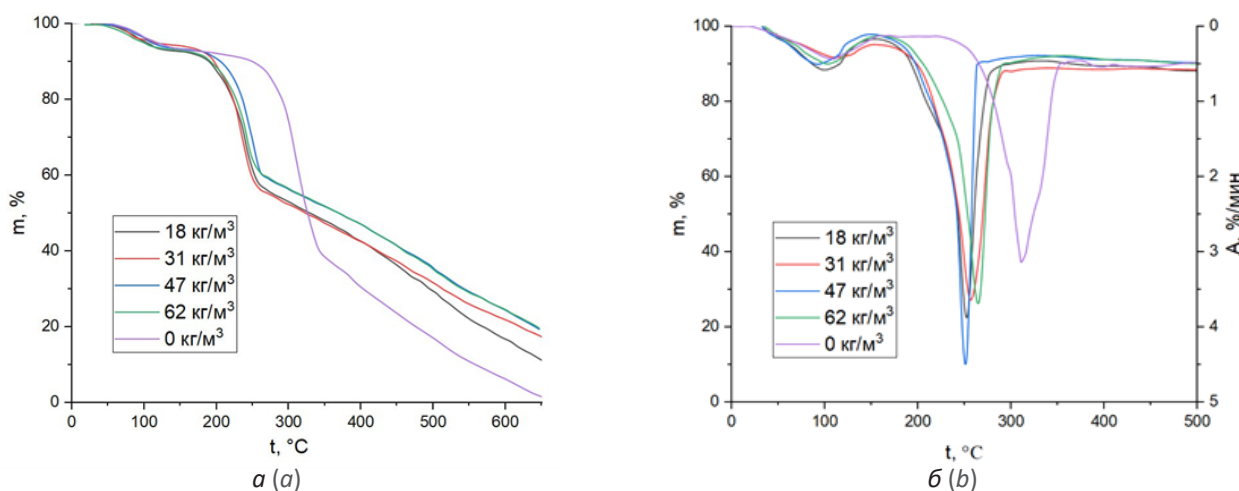


Рис. 2. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) древесины, пропитанной моноаммонийфосфатом
Fig. 2. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with monoammonium phosphatе

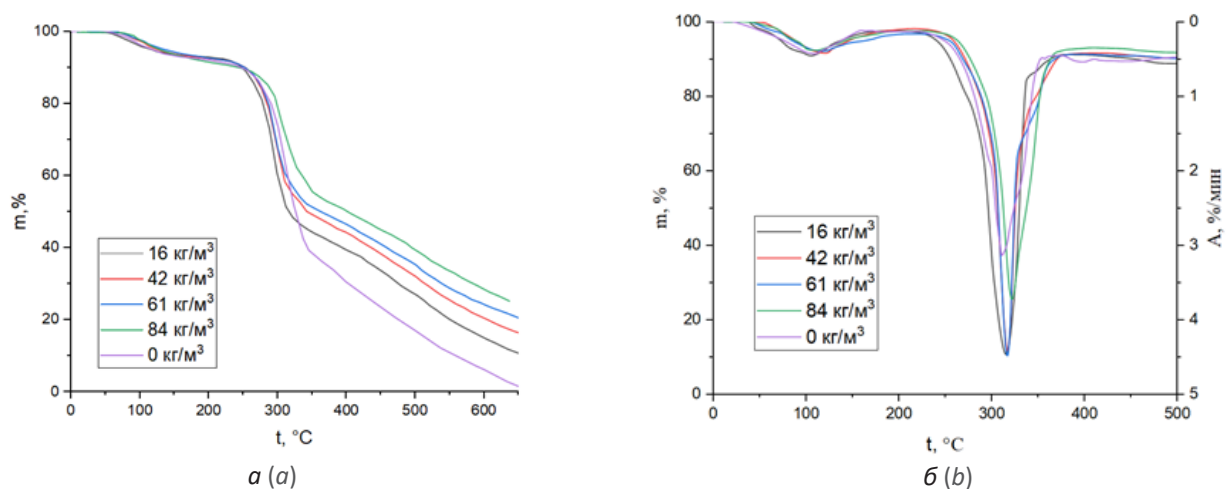


Рис. 3. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) древесины, пропитанной аммонием тетраборнокислым 4-водным
Fig. 3. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with ammonium tetraboric acid 4-aqueous

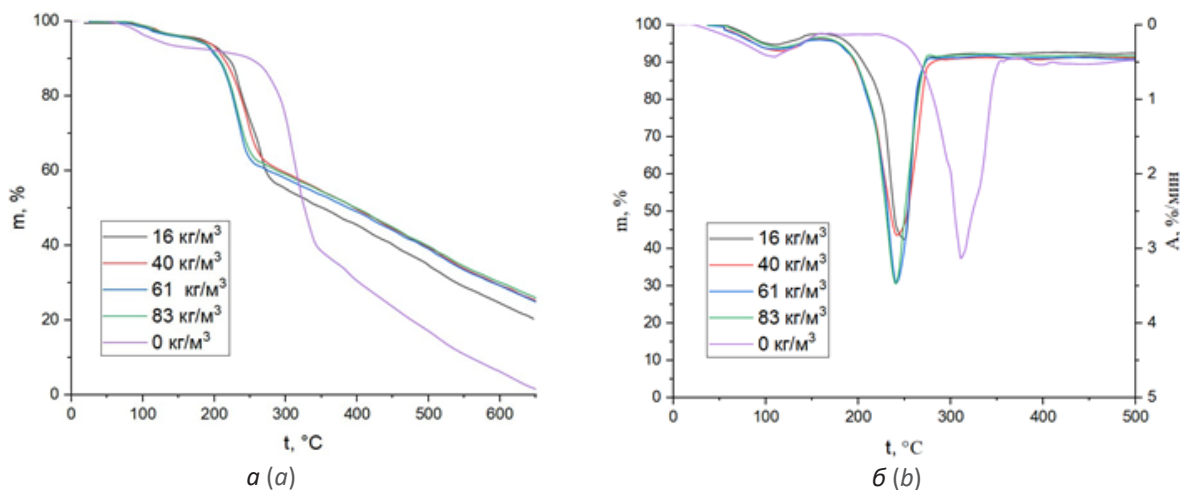


Рис. 4. Кривые ТГ (а) и ДТГ (б) древесины, пропитанной смесью моноаммонийфосфата и аммония тетраборнокислотного 4-водного в соотношении 3:1

Fig. 4. Curves TG (a) and DTG (b) of wood impregnated with a mixture of monoammonium phosphate and ammonium tetraboric acid 4-water in a ratio of 3:1

Разложение непропитанной древесины (на графиках обозначено «0 кг/м³») характеризуется тремя основными стадиями. На первом этапе при температуре в среднем 100 °С происходит потеря приблизительно 8 % массы, связанная с выделением содержащейся влаги в образце. Основная стадия интенсивного термоокислительного разложения происходит в интервале 180–360 °С и сопровождается максимумом скорости потери массы (3,2 %/мин) при температуре около 315 °С. На третьей стадии происходит сгорание углистого остатка с полной потерей массы до 700 °С.

Для древесины, пропитанной моноаммонийфосфатом, основная стадия термоокислительного разложения смещается в область более низких температур, а максимум скорости потери массы наблюдается при 250–260 °С во всем исследованном диапазоне общих поглощений. Начало интенсивного разложения приходится на 150 °С. Третья стадия разложения углистого остатка становится более длительной, и полная потеря массы уже не наблюдается при 700 °С. Выход несгораемого остатка увеличивается с общим поглощением антипирена.

Для образцов, пропитанных аммонием тетраборнокислым 4-водным, смещение пика основной стадии разложения не наблюдается, и он совпадает с непропитанной древесиной при температуре в среднем 315 °С. При этом наблюдается увеличение выхода углистого остатка, который пропорционален общему поглощению антипирена.

Для образцов, пропитанных смесью антипиренов, наблюдается еще больший сдвиг потери массы в область низких температур по сравнению с индивидуальным моноаммонийфосфатом. Максимум скорости потери массы наблюдается уже при 240 °С в зависимости от общего поглощения смеси антипиренов. Выход углистого остатка увеличивается по сравнению с образцами, пропитанными индивидуальными веществами. Данный факт свидетельствует о наличии синергетического эффекта в смеси, который в большей степени катализирует термическое разложение древесины и тем самым раньше начинается процесс обугливания и образования защитного коксового слоя на поверхности, а количество его увеличивается. Логично предположить, что если бы отсутствовало взаимное усиление свойств, то пик максимума

скорости потери массы в смеси антипиренов (рис. 4б) располагался бы правее температуры 240 °С и по мере уменьшения содержания моноаммонийфосфата приближался к пику при 315 °С непропитанной древесины и аммония тетраборнокислого 4-водного.

По экспериментальным данным, полученным с помощью ДТА, был проведен расчет кинетических параметров основной стадии термического разложения. В таблице представлены сводные экспериментальные и расчетные данные исходной и пропитанной

древесины исследуемыми антипиренами в зависимости от поглощения: температура максимума ДТГ-кривой, потеря массы образца в интервале температур основной стадии терморазложения, максимальная скорость потери массы, коксовый остаток при 500 °С и рассчитанные энергия активации и предэкспоненциальный множитель в интервале температур основной стадии терморазложения. На рис. 5 представлены зависимости энергии активации E_a процесса термического разложения от поглощения антипиренов.

Таблица
Основные параметры процесса термического разложения исходной и пропитанной антипиренами древесины

Table
The main parameters of the thermal decomposition process of the original and flame retardant-impregnated wood

Поглощение, кг/м ³ Absorption, kg/m ³	Температура максимума потери массы, T_{max} , °С Maximum mass loss temperature, T_{max} , °С	Максимальная скорость потери массы A_{max} , %/мин Maximum mass loss A_{max} , %/min	Потеря массы, Δm , % Weight loss, Δm , %	Остаток, %, при 500 °С Residue %, at 500 °С	Температурный интервал, °С Temperature range, °С	Энергия активации, E_a , кДж/моль Activation energy, E_a , kJ/mol	Предэкспоненциальный множитель, k The pre-exponential multiplier, k
Непропитанная древесина / Non-impregnated wood							
0	315	3,2	54,4	17,6	180–360	95,7	$8,3 \cdot 10^{10}$
Моноаммонийфосфат / Monoammonium phosphate							
18	250	3,8	41,2	30,2	156–325	111,4	$2,72 \cdot 10^{13}$
31	255	3,6	40,0	32,6	155–290	112,8	$3,30 \cdot 10^{13}$
47	252	4,5	34,0	38,6	154–300	112,9	$3,35 \cdot 10^{13}$
62	260	3,7	32,8	38,9	150–292	113,9	$5,77 \cdot 10^{13}$
Аммоний тетраборнокислый 4-водный / Ammonium tetraborate 4-aqueous							
16	320	4,5	49,6	28,0	202–374	93,7	$2,92 \cdot 10^{10}$
42	320	4,5	44,0	32,2	210–366	116,2	$3,51 \cdot 10^{12}$
61	320	4,5	40,9	37,5	202–366	114,4	$3,00 \cdot 10^{12}$
84	325	3,7	40,0	41,2	211–374	125,7	$1,84 \cdot 10^{13}$
Моноаммонийфосфат — аммоний тетраборнокислый 4-водный 3:1 / Monoammonium phosphate — ammonium tetraborate 4-aqueous 3:1							
16	245	2,9	40,0	35,0	158–308	109,2	$1,22 \cdot 10^{13}$
40	240	2,8	36,0	38,9	158–274	125,5	$1,52 \cdot 10^{15}$
61	240	3,5	35,8	39,8	155–282	135,3	$1,58 \cdot 10^{16}$
83	240	3,5	33,6	40,0	158–287	137,7	$3,41 \cdot 10^{16}$

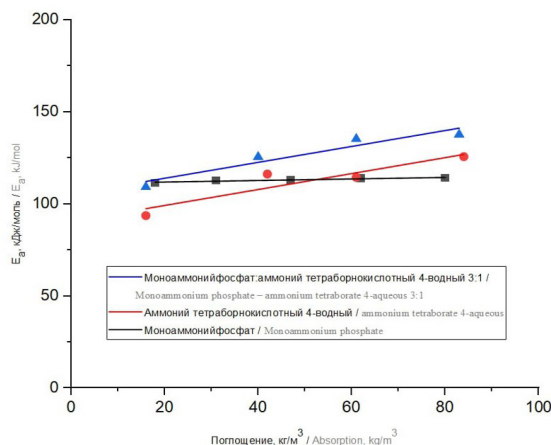


Рис. 5. Зависимость энергии активации E_a от поглощения ($\text{кг}/\text{м}^3$) антипиренов
 Fig. 5. Dependence of the E_a activation energy on the absorption ($\text{кг}/\text{м}^3$) of flame retardants

Анализируя полученные экспериментальные и расчетные данные, установлено, что для всех антипиренов выход коксового остатка увеличивается, а потеря массы в пике интенсивного терморазложения снижается с увеличением общего поглощения. Энергия активации основной стадии термического разложения древесины с моноаммонийфосфатом практически не меняется с увеличением содержания вещества и равна в среднем 113 кДж/моль, для аммония тетраборнокислого 4-водного она растет по мере увеличения общего поглощения и достигает 125,7 кДж/моль при 84 $\text{кг}/\text{м}^3$, а для смеси антипиренов 3:1 (синяя линия на рис. 5) при равных поглощениях с индивидуальными веществами энергия активации больше в среднем на 15 кДж/моль, что

говорит о большей термостойкости древесины, пропитанной смесью исследуемых веществ, и свидетельствует о взаимном усилении защитных свойств.

Для исследуемых антипиренов определена огнезащитная эффективность в соответствии с требованиями ГОСТ 30028.3–2022 [13]. На рис. 6 представлен график зависимости потери массы образцов от общего поглощения антипиренов. Установлено, что общее поглощение, обеспечивающее потерю массы 25 %, для моноаммонийфосфата составляет 33 $\text{кг}/\text{м}^3$, что соответствует II классу огнезащитной эффективности, аммония тетраборнокислого 4-водного 62 $\text{кг}/\text{м}^3$ — III класс, а смесь данных антипиренов при 23 $\text{кг}/\text{м}^3$ обеспечивает I класс.

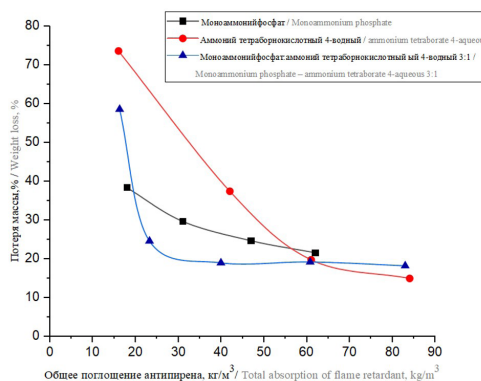


Рис. 6. График зависимости потери массы образца (%) от общего поглощения ($\text{кг}/\text{м}^3$) антипиренов
 Fig. 6. Graph of the dependence of the mass loss of the sample (%) on the total absorption ($\text{кг}/\text{м}^3$) of flame retardants

По графику на рис. 6 (синяя кривая) также наблюдается бóльшая огнезащитная эффективность смеси по сравнению с индивидуальными веществами, в нее входящими, в интервале поглощений от 20 до 60 кг/м³, то есть наблюдается взаимное усиление свойств. Если бы синергетические эффекты в смеси отсутствовали, то кривая ее потери массы от поглощения располагалась бы между линиями индивидуальных антипиренов и с уменьшением содержания более эффективного моноаммонийфосфата приближалась бы к кривой аммония тетраборнокислого 4-водного.

Заключение

В результате проведенного исследования методами ДТА определены кинетические параметры основной стадии интенсивного термоокислительного разложения древеси-

ны, пропитанной моноаммонийфосфатом, аммонием тетраборнокислым 4-водным и их смесью в массовом соотношении 3:1 с различными общими поглощениями. Установлено, что для смеси антипиренов энергия активации процесса разложения имеет наибольшие значения и возрастает с увеличением поглощения, а потеря массы уменьшается. Температура максимума потери массы при этом сдвигается примерно на 70 °С в область более низких температур, что способствует более раннему образованию защитного коксового слоя на поверхности древесины. Установлено, что огнезащитная эффективность в смеси взаимно усиливается и достигает I класса, по сравнению с индивидуальными антипиренами, в нее входящими. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают синергетический эффект в смеси исследуемых антипиренов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Characterisation of the fire behaviour of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms / R. A. Mensah et al. // *J Therm Anal Calorim.* 2023. Vol. 148. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s10973-022-11442-0
2. Берлин А. А., Сивенков А. Б., Хасанова Г. Ш. Химические основы снижения пожарной опасности материалов на основе целлюлозы // *Горение и плазмохимия.* 2021. № 19 (2). С. 65–77.
3. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // *Fire Science Reviews.* 2013. Vol. 2. Art. 4. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
4. Исследование параметров воспламеняемости и процесса термоокислительного разложения древесины в присутствии эффективных средств огнебиозащиты / А. А. Кобелев [и др.] // *Нанотехнологии в строительстве.* 2023. Т. 15, № 5. С. 474–481.
5. Комарова М. А. Огнезащитная эффективность покрытий металлических строительных конструкций при ускоренном климатическом старении / М. А. Комарова [и др.] // *Техносферная безопасность.* 2024. № 4 (45). С. 3–22.
6. ГОСТ 28815–2018. Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия. М., 2018. 23 с.

7. Мельников Н. О., Акинин Н. И. Влияние антипиренов на термическое разложение древесины // Химическая промышленность сегодня. 2022. № 5. С. 52–57. DOI: 10.53884/27132854_2022_5_52.
8. Исследование термического разложения огнезащитной древесины / Ю. В. Кривцов [и др.] // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 85–88.
9. Вопросы снижения пожарной опасности древесины / Н. И. Акинин, Н. О. Мельников, С. А. Максименко // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 3 (25). С. 28–31.
10. Способы и средства огнезащиты древесины : руководство / ВНИИПО МЧС России. 4-е изд., доп. и перераб. М., 2011. 80 с.
11. Оценка эффективности смесей антипиренов для огнезащиты древесины / В. Ю. Колесова [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 1 (46). С. 52–66.
12. Synergistic Study on the Effect of Flame Retardants on Timber / С. С. Nwajiobi et al. // American Journal of Engineering Research (AJER). 2015. Vol. 4. Iss. 12. P. 41–44.
13. ГОСТ 30028.3–2022. Средства защитные для древесины. Экспресс-метод определения огнезащитной эффективности. М., 2022. 6 с.

REFERENCES

1. Characterisation of the fire behaviour of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms / R. A. Mensah et al. // J Therm Anal Calorim. 2023. Vol. 148. P. 1407–1422. DOI: 10.1007/s10973-022-11442-0
2. Berlin A. A., Sivenkov A. B., Khasanova G. Sh. Chemical bases for reducing the fire hazard of cellulose-based materials // Gorenje i plasmochimistry. 2021. No. 19 (2). P. 65–77.
3. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. Art. 4. DOI: 10.1186/2193-0414-2-4
4. Study of the parameters of flammability and the process of thermal and oxidative decomposition of wood in the presence of effective fire protection agents / A. A. Kobelev et al. // Nanotechnology in construction. 2023. Vol. 15. No. 5. P. 474–481.
5. Fire-resistant effectiveness of coatings of metal building structures under accelerated climatic aging / M. A. Komarova et al. // Technosphere safety. 2024. No. 4 (45). P. 3–22.
6. GOST 28815–2018. Water solutions of protective agents for wood. Technical specifications. Moscow, 2018. 23 p.
7. Melnikov N. O., Akinin N. I. The effect of flame retardants on the thermal decomposition of wood // Chemical industry today. 2022. No. 5. P. 52–57. DOI: 10.53884/27132854_2022_5_52
8. Investigation of thermal decomposition of fire-proof wood / Y. V. Krivtsov et al. // Fire safety. 2010. No. 2. P. 85–88.
9. Issues of reducing the fire hazard of wood / N. I. Akinin, N. O. Melnikov, S. A. Maksimenko // Vector of Science Tolyatti State University. 2013. No. 3 (25). P. 28–31.
10. Methods and means of fire protection of wood: management / VNIIPPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 4th ed., additional and revised. Moscow, 2011. 80 p.
11. Evaluation of the effectiveness of flame retardants mixtures for fire protection of wood / V. Yu. Kolesova et al. // Technosphere safety. 2025. No. 1 (46). P. 52–66.

12. Synergistic Study on the Effect of Flame Retardants on Timber / С. С. Nwajobi et al. // American Journal of Engineering Research (AJER). 2015. Vol. 4. Iss. 12. P. 41–44.

13. GOST 30028.3–2022. Protective equipment for wood. Express method for determining flame-retardant effectiveness. Moscow, 2018. 23 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мельников Никита Олегович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); заведующий лабораторией исследований огнестойкости строительных конструкций научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций им. В. А. Кучеренко (109428, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, к. 1); РИНЦ ID: 694341; Scopus AuthorID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Шугаева Арина Романовна, магистрант кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); e-mail: arishechka01@bk.ru

Монахов Антон Андреевич, ассистент кафедры техносферной безопасности РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047, Российская Федерация, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, стр. 1); РИНЦ ID: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Черепанов Евгений Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры надзорной деятельности и права Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita O. Melnikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miuskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko (6 2nd Institutskaya St., Moscow, 109428, Russian Federation); ID RSCI: 694341; Scopus AuthorID: 57189368987; e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Arina R. Shugaeva, master's student of the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miuskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); e-mail: arishechka01@bk.ru

Anton A. Monakhov, Assistant Professor at the Department of Technosphere Safety, University Mendeleev (9 Miuskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation); ID RSCI: 1038060; e-mail: antonmonahov913@yandex.ru

Evgeny A. Cherepanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Supervision and Law, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Ykaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 849208; e-mail: cherepanov_evgen@mail.ru