

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025. Т. 34. № 1. С. 23–31
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2025; 34(1):23-31

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 004.93'12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2025.34.01.23-31>

Исследование огнезащитных составов для древесины

Маргарита Александровна Красильникова ✉, Николай Михайлович Барбин

Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы популярность древесины и композитов на ее основе в качестве строительных материалов постоянно растет благодаря их доступности и простоте дальнейшей обработки. По данным Росстата, в 2020 г. были достигнуты рекордные показатели по строительству домов из древесины, составившие 9,35 млн м². При этом древесина обладает высокой воспламеняемостью, что серьезно ограничивает ее применение в строительстве и других областях. В связи с этим исследования по ее огнезащите актуальны.

Цель и задачи. Исследовать огнезащитную эффективность вновь разработанных азотфосфорсодержащих огнезащитных составов (ОЗС) для древесины, полученных путем химической деструкции отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с алифатическими аминами и без них.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Получить огнезащитные составы для древесины на основе азотсодержащих продуктов деструкции полиэтилентерефталата ди- и полиаминами и без присутствия ПЭТФ.
2. Изучить огнезащитную эффективность вновь полученных огнезащитных составов для древесины.
3. Сравнить огнезащитную эффективность огнезащитных составов, полученных с применением полиэтилентерефталата и без него.

Материалы и методы. Объектами исследования были огнезащитные составы для древесины на основе продуктов аминолитизации полиэтилентерефталата алифатическими аминами. Метод заключался в определении потери массы образца древесины и времени самостоятельного горения при его испытании в установке «Керамическая труба».

Выводы. Разработанные огнезащитные составы для древесины на основе продуктов химической деструкции отходов полиэтилентерефталата обладают высокой огнезащитной эффективностью. В качестве ОЗС для древесины наиболее целесообразно использовать композицию на основе ПЭТФ – ПЭПА. Установлено, что разработанный состав относится к первой группе огнезащитной эффективности.

Ключевые слова: огнезащитная эффективность; полиэтилентерефталат; химическая деструкция, алифатические амины

Для цитирования: Красильникова М.А., Барбин Н.М. Исследование огнезащитных составов для древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 23–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.23-31

✉ Красильникова Маргарита Александровна, e-mail: krasilnikova79@mail.ru

Fire-retardant compositions for wood

Margarita A. Krasilnikova ✉, Nikolay M. Barbin

Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In recent years, the popularity of wood and composites based on it as building materials has been steadily increasing due to their availability and ease of further processing. According to Rosstat data, in 2020, record figures for the construction of houses from wood were reached, amounting to 9.35 million m². However, wood is highly flammable, which severely limits its use in construction and other applications. Therefore, research on its fire protection is relevant.

Aims and objectives. To investigate the fire-retardant efficiency of the developed nitrogen-phosphorus-containing fire-retardant compositions (FRC) for wood obtained by chemical degradation of polyethylene terephthalate (PET) waste with and without aliphatic amines.

In order to achieve the objective, the following tasks were defined:

1. To obtain fire-retardant compositions for wood based on nitrogen-containing degradation products of polyethylene terephthalate with di- and polyamines and without the presence of PET.

2. To study the fire-retardant efficiency of the newly obtained fire-retardant compositions for wood.
3. To compare the fire-retardant effectiveness of fire-retardant compositions obtained with and without the use of polyethylene terephthalate.

Methods. The objects of the study were fire-retardant compositions for wood based on aminolysis products of polyethylene terephthalate by aliphatic amines. The method consisted in determining the mass loss of a wood specimen and the time of independent combustion when it was tested in the "Ceramic Tube" unit.

Result and Discussion. As a result of the conducted research, it was revealed that the obtained fire-retardant compositions based on the products of chemical destruction of polyethylene terephthalate at the consumption of more than 160 g/m² belong to the first group of fire protection efficiency.

Conclusions. The developed fire-retardant compositions for wood on the basis of products of chemical destruction of polyethylene terephthalate waste have high fire-retardant efficiency. It is most expedient to use the composition based on PET – PEPA as FR for wood. It is established that the developed composition belongs to the first group of fire protection efficiency.

Keywords: fire protection efficiency; polyethylene terephthalate; chemical destruction

For citation: Krasilnikova M.A., Barbin N.M. Fire-retardant compositions for wood. *Pozharovzryvobezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):23-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.23-31 (rus).

✉ Margarita Aleksandrovna Krasilnikova, e-mail: krasilnikova79@mail.ru

Введение

«Древесина — уникальный природный композиционный материал, занимающий по своему применению лидирующие позиции в различных отраслях промышленности. По своим физико-механическим свойствам, соотношению показателя прочности к массе древесина может уступать только синтетическим полимерным материалам. На сегодняшний день объемы промышленного потребления древесины постоянно увеличиваются, так как древесина относится к категории доступных, возобновляемых видов природного сырья и имеет сравнительно низкую себестоимость добычи и переработки. Значительно снижает срок службы деревянных конструкций высокая пожарная опасность древесины. В настоящее время тенденции развития сферы деревянного домостроения формируют необходимость поиска путей повышения их качества, обеспечения пожаробезопасности строительных конструкций. Одним из центральных вопросов при использовании деревянных конструкций в строительстве является обеспечение требуемых показателей по пожарной опасности и огнестойкости» [1, 2]. Антипирены препятствуют воспламенению, замедляют горение горючих материалов и снижают интенсивность обугливания древесины, что повышает пределы огнестойкости деревянных конструкций [3, 4]. Огнезащитные составы могут действовать физическими, химическими или комбинированными способами. Принцип процесса замедления заключается в блокировании доступа кислорода путем физического подавления пламени или инициирования химической реакции, которая останавливает горение [5, 6].

«Огнезащитные составы, наносимые на древесину под воздействием температуры, превращающиеся в слой пены толщиной 1 см, который выполняет роль теплоизоляции. В результате этого

возгорание дерева замедляется, и образование дыма значительно снижается» [7, 8].

Коллектив авторов из Китая разработал новый эффективный антипирен, состоящий из трис (2-гидроксиэтил) изоцианурат трифосфата аммония, который был получен без растворителей для повышения огнестойкости плит из древесины тополя. У древесных плит, обработанных 20%-ным раствором антипирена, предельный кислородный индекс достиг 65,1 % [9].

Авторы [10] разработали антипирен на основе фосфор-азотного металлокомплекса, содержащего соль магния, для пропитки древесины, существенно снижающий потери массы древесины при огневых испытаниях. Установлено, что нанесение огнезащитного препарата в количестве 300 г/м² позволяет получать материалы с огнезащитной эффективностью, соответствующей I группе эффективности.

Рассмотрено влияние коксообразующих антипиренов на прогрев и интенсивность обугливания древесины в условиях пожара. Показано, что применение средств огнезащиты может существенно влиять на показатель скорости обугливания деревянных



Рис. 1. Установка для определения эффективности огнезащитных составов «Керамическая труба»

Fig. 1. Installation for determining the effectiveness of fire-retardant compositions "Ceramic pipe"

конструкций. Показана необходимость продолжения изучения влияния различных огнезащитных систем на прогрев и скорость обугливания деревянных конструкций [11]. В статье [12] приводится оценка возможности создания огнезащитных покрытий методом мягкой поверхностной модификации древесины на основе фосфорорганических соединений [13] и нанодисперсного кремнезема. Полученные покрытия придают поверхности огнезащитные и гидрофобные свойства, а также снижают водопоглощение древесины.

Авторами [14] были получены огнестойкие, водонепроницаемые покрытия для защиты древесины. Был предложен экологичный и простой способ получения таких покрытий, при которых нелетучий полиуретан на водной основе смешивали с промышленными антипиренами.

В исследовании [15] использовались материалы из биомассы каррагинана и водорастворимый коллаген в качестве синергетических огнезащитных и дымоподавляющих агентов. С помощью ультразвуковой пропитки внедрили антипирен внутрь древесины. В результате была получена антипиренованная древесина на основе биомассы.

Цель и задачи

Исследовать огнезащитную эффективность вновь разработанных азотфосфорсодержащих огнезащитных составов (ОЗС) для древесины, полученных путем химической деструкции отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с алифатическими аминами и без них.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Получить огнезащитные составы для древесины на основе азотсодержащих продуктов деструкции полиэтилентерефталата ди- и полиаминами и без присутствия ПЭТФ.
2. Изучить огнезащитную эффективность вновь полученных огнезащитных составов для древесины.
3. Сравнить огнезащитную эффективность огнезащитных составов, полученных с применением полиэтилентерефталата и без него.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента по определению огнезащитной эффективности были использованы образцы древесины сосны, обработанные огнезащитными составами. Огнезащитные составы

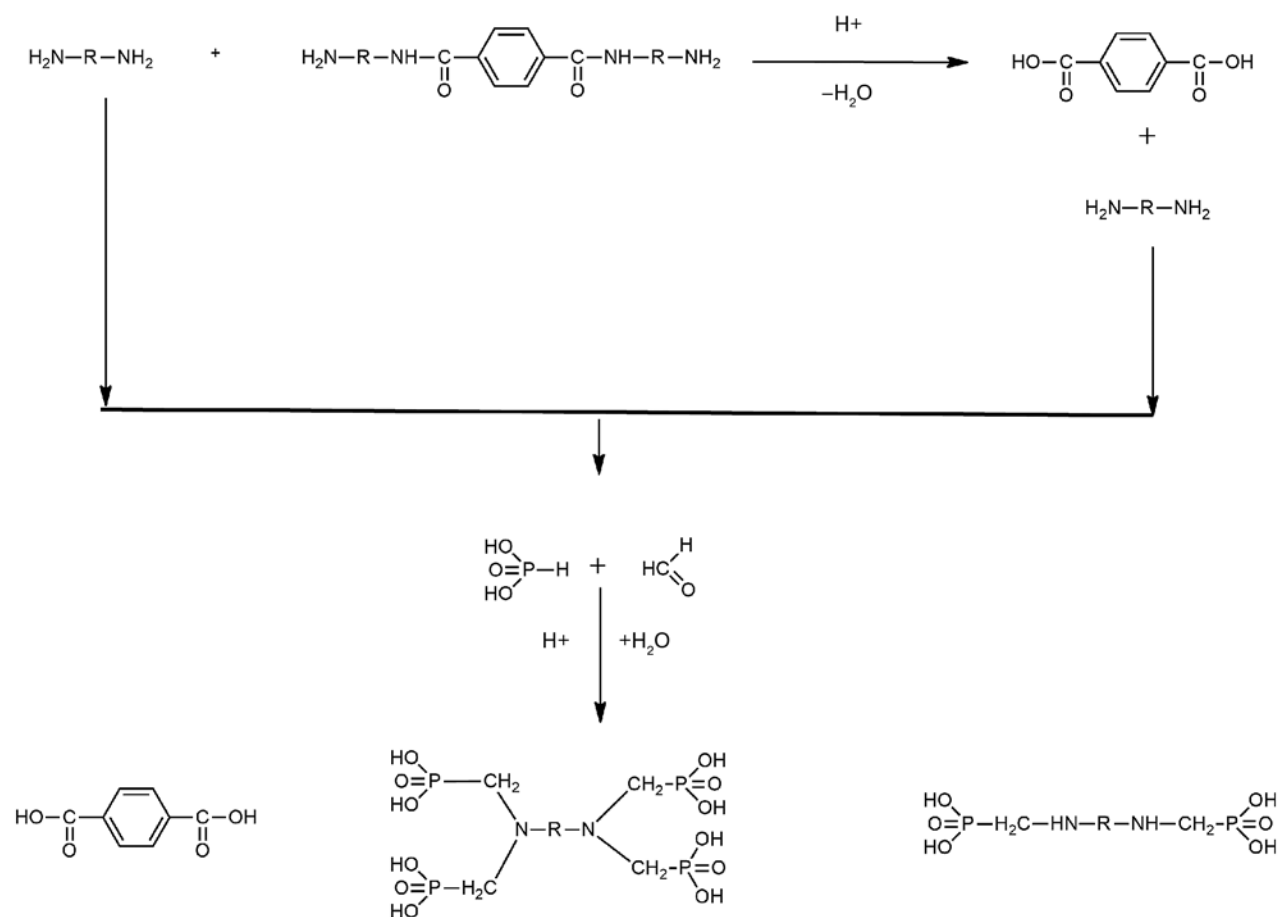


Рис. 2. Схема получения огнезащитного состава

Fig. 2. Scheme for production of fire-retardant composition

Физико-химические свойства огнезащитных составов
Physico-chemical properties of fire-retardant compositions

Огнезащитный состав Fire-retardant composition	Внешний вид Form	Массовая доля сухого остатка, % Mass fraction of dry residue, %	Плотность, г/м ³ Density, g/m ³	pH
ПИРИЛАКС (КО) PIRILAX (CS)	Жидкость желтого цвета Liquid yellow colour	71,0	1,210	1–2,5
ОЗС ПЭПА (ОЗС-1) FR PEPA (FR-1)	Жидкость темно-желтого цвета Liquid dark yellow colour	63,0	1,297	4
ОЗС ГМДА (ОЗС-2) FR GMDA (FR-2)	Жидкость желтого цвета Liquid yellow colour	43,5	1,204	7
ОЗС ЭДА (ОЗС-3) FR EDA (FR-3)	Жидкость коричневого цвета Brown liquid	61,0	1,198	3
ОЗС ПЭТФ – ГМДА (ОЗС-4) FR PET – HMDA (FR-4)	Жидкость светло-коричневого цвета Liquid light brown	41,7	1,160	6
ОЗС ПЭТФ – ПЭПА (ОЗС-5) FR PET – PEPA (FR-5)	Жидкость темно-коричневого цвета Liquid dark brown	46,4	1,220	7
ОЗС ПЭТФ – ЭДА (ОЗС-7) FR PET – EDA (FR-7)	Жидкость желтого цвета Liquid yellow colour	41,9	1,130	4

были получены в результате химической деструкции отходов ПЭТФ алифатическими аминами [16, 17].

Для первичной оценки огнезащитной эффективности полученных ОЗС были проведены испытания методом «огневой трубы» (рис. 1). Определялась потеря массы образцов сосны размерами 100 × 35 × 5 мм в зависимости от расхода огнезащитного покрытия под действием спиртовой горелки в течение 2 мин.

Огнезащитную эффективность образцов древесины, обработанных полученными огнезащитными составами, определяли по ГОСТ Р 53292–2009¹.

Результаты и обсуждение

Продукты аминолитиза ПЭТФ, являющиеся смесью диамидов ТФК и непрореагировавших аминов, были использованы для получения фосфорсодержащих ОЗС путем фосфорилирования продуктов аминолитиза ПЭТФ по реакции Кабачника – Филдса с получением α-аминометиленфосфоновых кислот [18]. Схема получения огнезащитных составов представлена на рис. 2.

Из литературных источников [10, 18] известно, что аммонийные соли α-аминометиленфосфоновых

кислот являются эффективными замедлителями горения древесины.

Свойства предоставленных образцов ОЗС были исследованы по следующим показателям: плотность, pH, внешний вид, массовая доля сухих веществ. Результаты исследований приведены в таблице.

Огнезащитные составы с применением чистых ди- и полиаминов имеют массовую долю сухого остатка выше, чем ОЗС, полученные путем деструкции бытовых отходов. Это, вероятно, связано с наличием продуктов аминолитиза в составе ОЗС, полученных путем деструкции отходов полиэтилентерефталата.

С целью определения оптимального расхода огнезащитных составов с максимальной огнезащитной способностью была проведена первичная оценка новых составов. Были проведены исследования по обработке древесных образцов несколькими слоями ОЗС: от 1 до 4. Для сравнения влияния поглощения ОЗС на потерю массы при горении использовали древесные материалы, пропитанные составами ОЗС-1 и ОЗС-7. В качестве контрольного использовали древесный образец (КО), пропитанный ОЗС Пирилакс [19].

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные с применением ОЗС, синтезированных путем деструкции бытовых отходов в сравнении с контрольным образцом.

Из графика видно, что огнезащитный состав на основе ПЭТФ – ПЭПА [16] наиболее эффективен

¹ ГОСТ Р 53292–2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2007.

вен, потеря массы образца составляет 15 % при расходе 100 г/м², в то время как потеря массы контрольного образца при таком же расходе — более 40 %. Образцы, обработанные составами ПЭТФ – ГМДА и ПЭТФ – ЭДА, при расходе от 70 до 100 г/м² имеют потерю массы образца при горении более 20 %.

Для сравнения огнезащитной эффективности составов с применением чистых ди- и полиаминов и ОЗС, полученных путем деструкции бытовых отходов, была определена потеря массы древесных образцов, обработанных ОЗС, полученных по реакции фосфорилирования на основе чистых аминов (ЭДА, ГМДА, ПЭПА). Результаты исследований представлены на рис. 4.

Из графика видно, что при расходе ОЗС на основе ПЭПА и ГМДА от 25 г/м² потеря массы при горении не превышает 15 %, в то время как при расходе состава на основе ЭДА в количестве 50 г/м² потеря массы при горении составляет более 60 %. Потеря массы контрольного образца, обработанного Пирилаксом, при том же расходе (75 г/м²) превышает 50 %. Таким образом, при расходе ОЗС с применением чистых ди- и полиаминов в количестве 75 г/м² позволяет снизить потерю массы при горении до 10 %. На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что наиболее целесообразно применять ОЗС на основе ПЭПА, так как он является доступным и дешевым сырьем по сравнению с другими аминами.

Предварительная оценка эффективности огнезащитных составов по методу «Огневая труба» показала, что применение азотфосфорсодержащих ОЗС с применением чистых ди- и полиаминов и полученных путем деструкции бытовых отходов приводит к снижению потери массы образцов древесины при горении [19].

Наиболее целесообразно применять ОЗС на основе чистого ПЭПА с расходом 100 г/м² при нанесении 2 слоев антипирена.

Для определения огнезащитной эффективности синтезированных ОЗС проведены испытания в соответствии с ГОСТ Р 53292–2009¹ с применением установки «Керамическая труба» (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что огнезащитный состав с использованием ОЗС на основе ПЭТФ – ПЭПА наиболее эффективен. При расходе ОЗС 150 г/м² и более потеря массы при горении древесного образца составляет менее 9 %. С применением в качестве ОЗС раствора на основе ЭДА и ГМДА аналогичный показатель достигается при расходе 250 и 350 г/м² соответственно. Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее целесообразно в качестве ОЗС применять состав на основе ПЭТФ – ПЭПА. Данный состав по потере массы образцов можно отнести к 1-й группе огнезащитной эффективности.

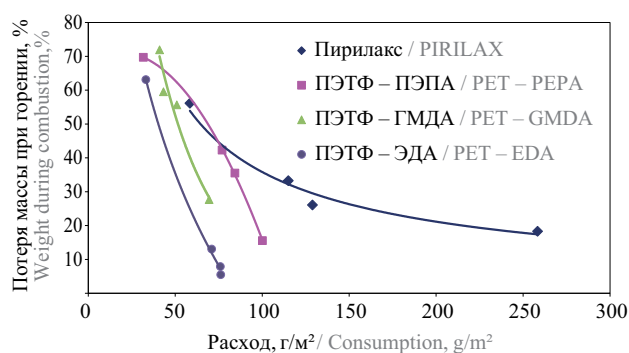


Рис. 3. Зависимость потери массы образцов ОЗС, синтезированных путем деструкции бытовых отходов от расхода ОЗС
Fig. 3. Dependence of mass loss of FR specimens synthesized by destruction of household waste of fire-retardant consumption

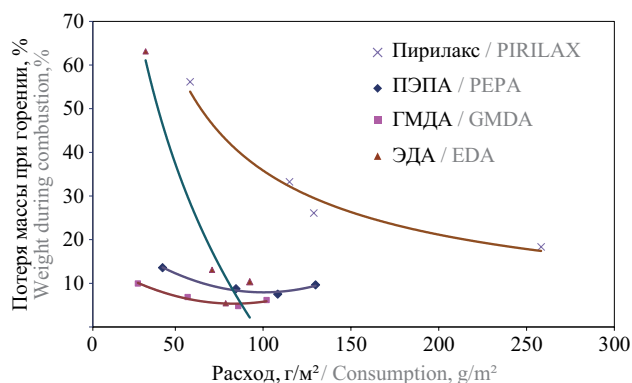


Рис. 4. Зависимость потери массы образцов ОЗС, полученных по реакции фосфорилирования на основе чистых аминов от расхода ОЗС
Fig. 4. Dependence of mass loss of FR specimens obtained by phosphorylation reaction based on pure amines of fire-retardant consumption

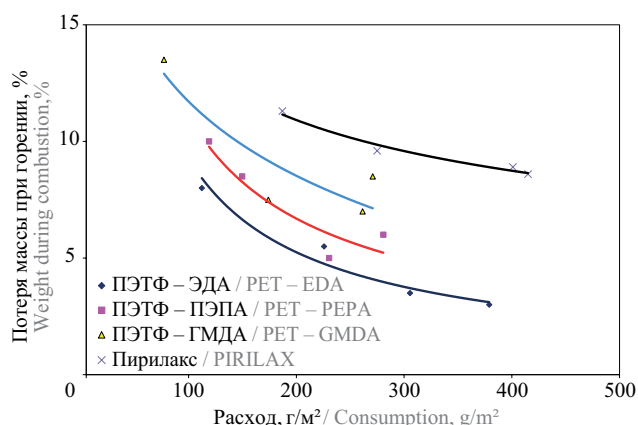


Рис. 5. Зависимость потери массы образцов от расхода ОЗС (испытания на установке «Керамическая труба»)
Fig. 5. Dependence of mass loss of specimens on the consumption of fire-retardant composition (tests on the "Ceramic Tube" installation)

Используя металлографический микроскоп МЕТАМ ЛВ–41, исследовали структуру поверхности обработанных ОЗС образцов (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что на поверхности древесных образцов, обработанных огнезащитными соста-

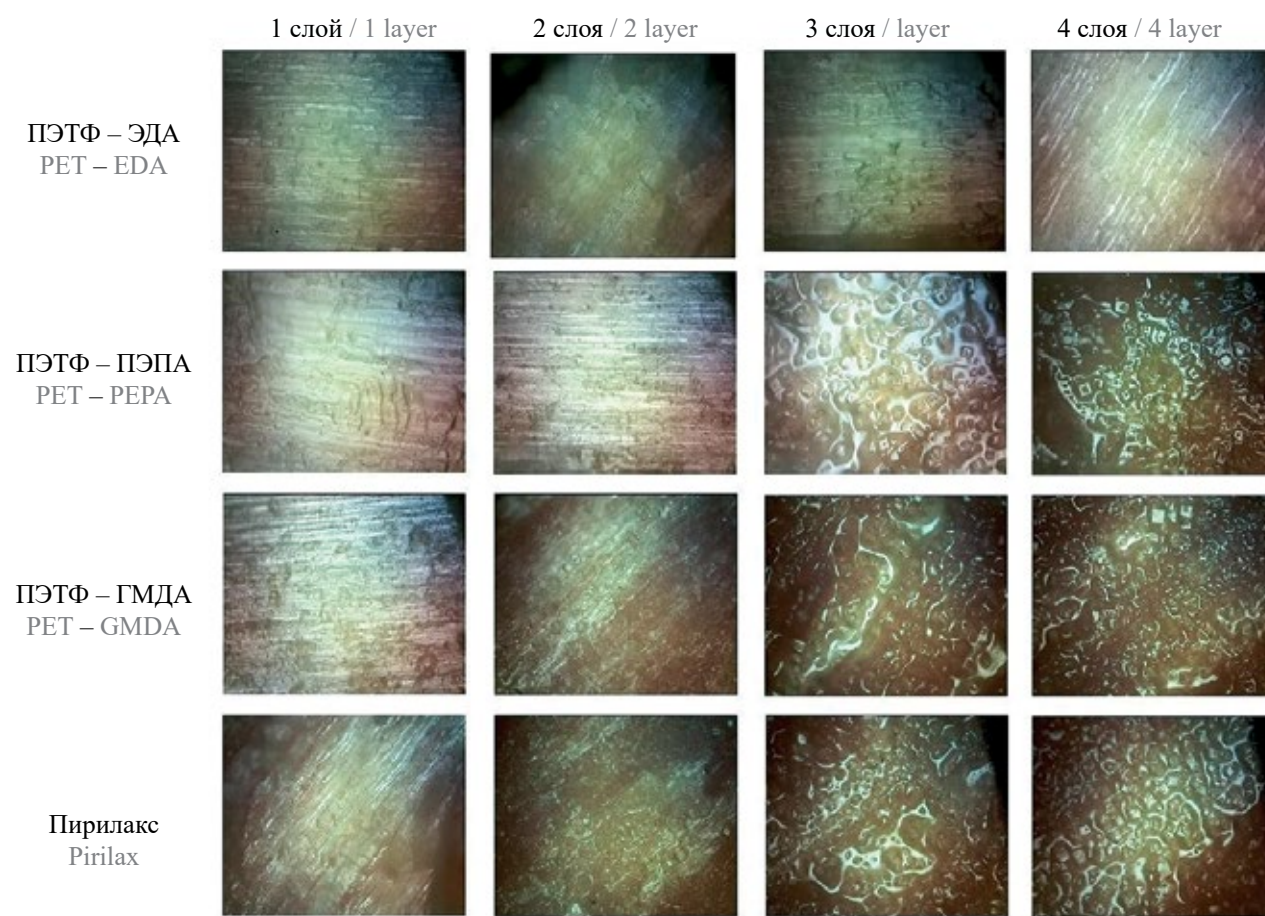


Рис. 6. Структура поверхности обработанных ОЗС образцов древесины
Fig. 6. Surface structure of fire-retardant wood specimens

вами, полученными на основе продуктов аминотерификации полиэтилентерефталата, при нанесении 3–4 слоев образуются кристаллы. Это связано с образованием солей аммония.

Выводы

Получены огнезащитные составы для древесины взаимодействием α -метилфосфоновых кислот ди- и полиаминов с водным раствором аммиака. Проведена первичная оценка огнезащитной эффективности азотфосфорсодержащих составов для древесины, содержащих аммонийные соли α -метилфосфоновых кислот и этиленгликоль, установлено, что все полученные ОЗС обладают высокой эффективностью. Испытания огнезащитных составов проводились по стандартной методике, описанной в ГОСТе¹. Проведенные исследования показали, что наиболее

целесообразно в качестве ОЗС применять состав на основе ПЭТФ – ПЭПА. Данный состав по потере массы образцов можно отнести к первой группе огнезащитной эффективности.

Однако при достижении данного результата необходимо нанести 4 слоя ПЭТФ – ПЭПА и только 2 слоя ОЗС на основе чистого ПЭПА. Таким образом, с экономической точки зрения наиболее целесообразно применять ОЗС на основе чистого ПЭПА, но он не решает проблему утилизации отходов ПЭТФ.

Предварительная оценка эффективности огнезащитных составов по методу «огневая труба» показала, что применение азотфосфорсодержащих ОЗС с применением чистых ди- и полиаминов и полученных путем деструкции бытовых отходов приводит к снижению потери массы образцов древесины при горении.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Albert Ch.M., Liew K.Ch. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites : a 10-year review from 2012 to 2021 // Journal of Bioresources and Bioproducts. 2024. Vol. 9. Issue 1. Pp. 27–42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004

2. Газизов А.М., Ахмаров Р.Г., Абдрахманова А.И. Обоснование и подбор компонентов огнезащитного состава для древесины // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2022. № 5. С. 5–20. DOI: 10.17122/ogbus-2022-5-5-20
3. Сафин Р.Р., Гирфанов А.А., Сафина А.В. Исследование огнезащитной эффективности деревянных конструкций различного периода эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2 (58). С. 107–112. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-107-112
4. Troitzsch J.H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2023. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
5. Rudzīte S., Bukšāns E. Impact of high-pressure impregnation and fire protective coatings on the reaction to fire performance of birch plywood // Rural Sustainability Research. 2021. No. 45 (340). Pp. 65–75. DOI: 10.2478/plua-2021-0008
6. Федотов И.О., Сивенков А.Б., Ислямбек Д.Б., Нагановский Ю.К. Термодеструктивные превращения древесины в присутствии замедлителей горения различного механизма огнезащиты. Полимерные материалы пониженной горючести : сб. мат. XI Междунар. конф. / отв. ред. М.А. Ваниев, А.Б. Сивенков. Волгоград, 2023. С. 142–146.
7. Zhang Yingnan, Jing Mingju, Zhang Muchen, Hou Shuya, Zhang Bin. Preparation and Properties of Silica Gel Foam as Fire-Retardant with High Water Retention for Wood // Fire Technology. 2022. Issue 58. No. 6. С. 3597–3621. DOI: 10.1007/s10694-022-01334-y
8. Aljamal Amer, Szolnoki Beata, Marosi Gyorgy. Improving thermal and flame-retardant properties of sorbitol-based bioepoxy systems by phosphorus-based flame retardants // Fire and Materials. 2022. Issue 46. No. 3. Pp. 605–614. DOI: 10.1002/fam.3010
9. Dong Yan, Dong Chen, Jia Tan, Liping Yuan, Zizhi Huang, Dongfang Zou et al. Synergistic flame-retardant effect of a new N-P flame retardant on poplar wood density board // Polymer Degradation and Stability. 2023. Vol. 211. P. 110331. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110331
10. Лунева Н.К., Онуфриева А.В., Езовитова Т.И., Шевчук В.В., Смычник А.Д. Композиция ингибитора горения древесины на основе фосфор-азотного магнийсодержащего металлокомплекса // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90. № 9. С. 1205–1214. EDN ZVMKAB.
11. Газизов А.М., Садыкова А.М., Садыков А.И. Пределы огнестойкости древесины в зависимости от времени пропитки // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2023. № 4. С. 5–16. DOI: 10.17122/ogbus-2023-4-5-16. EDN YTEKNZ.
12. Покровская Е.Н. Огнезащитные покрытия с участием нанодисперсного кремнезема // Экономика строительства. 2023. № 3. С. 118–122.
13. Jinhan Lu, Peng Jiang, Zhilin Chen, Luming Lia, Yuxiang Huang. Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 267. P. 121042. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121042. EDN YIVEBA.
14. Wentao Hao, Qiannan Zheng, Yangningjie Zhonga, Xiangkun Meng, Hualin Wang, Longzhen Qiub et al. An eco-friendly and facile method to prepare waterborne polyurethane based fire-resistant & waterproof coatings for wood protection // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 185. P. 107892. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107892
15. Bin Liu, Penghui Liu, Zhan Ma, Musenge Chola, Mo Chen, Hongying Guo et al. Chemical, pyrolysis, combustion properties and mechanism analysis of wood treated with biomass-based carrageenan-collagen modified ammonium polyphosphate // Surfaces and Interfaces. 2024. Vol. 46. P. 104121. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.104121
16. Crippa M., Morico B. PET depolymerization: a novel process for plastic waste chemical recycling // Studies in Surface Science and Catalysis. 2020. Vol. 179. Pp. 215–229. DOI: 10.1016/B978-0-444-64337-7.00012-4
17. Балакин В.М., Красильникова М.А. Азотфосфорсодержащие огнезащитные составы на основе продуктов деструкции полиэтилентерефталата алифатическими ди- и полиаминами // Известия ВолГТУ. 2015. № 7 (164). С. 162–165. EDN UZBIYL.
18. Черкасов Р.А., Галкин В.И. Реакция Кабачника – Филдса: синтетический потенциал и проблема механизма // Успехи химии. 1998. Т. 67. № 10. С. 940–968. EDN MPAYIF.
19. Балакин В.М., Красильникова М.А., Стародубцев А.В., Пазникова С.Н., Ахметов Т.И., Целоусов Д.В. и др. Сравнительная оценка огнезащитных свойств фосфорсодержащих антипиренов на основе продуктов аминолита полиэтилентерефталата // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2013. Т. 22. № 4. С. 29–32.

REFERENCES

1. Albert Ch.M., Liew K.Ch. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites : a 10-year review from 2012 to 2021. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2024; 9(1):27-42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004
2. Gazizov A.M., Akhmarov R.G., Abdrakhmanova A.I. Justification and selection of components of fire protection composition for wood. *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*. 2022; 5:5-20. DOI: 10.17122/ogbus-2022-5-5-20 (rus).
3. Safin R.R., Girfanov A.A., Safina A.V. Investigation of fire-retardant effectiveness of wooden structures during various periods of operation. *Systems. Methods. Technologies*. 2023; 2(58):107-112. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-107-112 (rus).
4. Troitzsch J.H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2023. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
5. Rudzīte S., Bukšāns E. Impact of high-pressure impregnation and fire protective coatings on the reaction to fire performance of birch plywood. *Rural Sustainability Research*. 2021; 45(340):65-75. DOI: 10.2478/plua-2021-0008
6. Fedotov I.O., Sivenkov A.B., Islyabmek D.B., Naganovskiy Yu.K. *Thermal-destructive transformations of wood in the presence of flame retardants of various fire protection mechanisms. Polymer materials of low flammability : collection of materials of the XI International Conference / ed. M.A. Vaniyev, A.B. Sivenkov*. 2023; 142-146 (rus).
7. Zhang Yingnan, Jing Mingju, Zhang Muchen, Hou Shuya, Zhang Bin. Preparation and Properties of Silica Gel Foam as Fire-Retardant with High Water Retention for Wood. *Fire Technology*. 2022; 58(6):3597-3621. DOI: 10.1007/s10694-022-01334-y
8. Aljamal Amer, Szolnoki Beata, Marosi Gyorgy. Improving thermal and flame-retardant properties of sorbitol-based bio-epoxy systems by phosphorus-based flame retardants. *Fire and Materials*. 2022; 46(3):605-614. DOI: 10.1002/fam.3010
9. Dong Yan, Dong Chen, Jia Tan, Liping Yuan, Zizhi Huang, Dongfang Zou et al. Synergistic flame-retardant effect of a new N-P flame retardant on poplar wood density board. *Polymer Degradation and Stability*. 2023; 211:110331. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110331
10. Luneva N.K., Onufriyeva A.V., Yezovitova T.I., Shevchuk V.V., Smychnik A.D. Wood combustion inhibitor composition based on phosphorus-nitrogen magnesium-containing metal complex. *Journal of Applied Chemistry*. 2017; 90(9):1205-1214. EDN ZVMKAB. (rus).
11. Gazizov A.M., Sadykova A.M., Sadykov A.I. Fire resistance limits of wood depending on impregnation time. *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*. 2023; 4:5-16. DOI: 10.17122/ogbus-2023-4-5-16. EDN YTEKNZ. (rus).
12. Pokrovskaya E.N. Fire-protective coatings with nanodispersed silica. *Construction Economics*. 2023; 3(118-122). (rus).
13. Jinhan Lu, Peng Jiang, Zhilin Chen, Luming Lia, Yuxiang Huang. Flame retardancy, thermal stability, and hygroscopicity of wood materials modified with melamine and amino trimethylene phosphonic acid. *Construction and Building Materials*. 2021; 267:121042. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121042. EDN YIVEBA.
14. Wentao Hao, Qiannan Zheng, Yangningjie Zhonga, Xiangkun Meng, Hualin Wanga, Longzhen Qiub et al. An eco-friendly and facile method to prepare waterborne polyurethane based fire-resistant & waterproof coatings for wood protection. *Progress in Organic Coatings*. 2023; 185:107892. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107892
15. Bin Liu, Penghui Liu, Zhan Ma, Musenge Chola, Mo Chen, Hongying Guo et al. Chemical, pyrolysis, combustion properties and mechanism analysis of wood treated with biomass-based carrageenan-collagen modified ammonium polyphosphate. *Surfaces and Interfaces*. 2024; 46:104121. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.104121
16. Crippa M., Morico B. PET depolymerization: a novel process for plastic waste chemical recycling. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2020; 179:215-229. DOI: 10.1016/B978-0-444-64337-7.00012-4
17. Balakin V.M., Krasilnikova M.A. Nitrogen-phosphorus-containing fire-retardant compositions based on the products of polyethylene terephthalate destruction by aliphatic di- and polyamines. *VolGTU news*. 2015; 7(164):162-165. EDN UZBIYL. (rus).
18. Cherkasov R.A., Galkin V.I. Kabachnik – Fields reaction: synthetic potential and the problem of mechanism. *Advances in Chemistry*. 1998; 67(10):940-968. EDN MPAYIF. (rus).
19. Balakin V.M., Krasilnikova M.A., Starodubtsev A.V., Paznikova S.N., Akhmetov T.I., Tselousov D.V. et al. Comparative assessment of fire-protective properties of phosphorus-containing fire retardants based on polyethylene terephthalate aminolysis products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2013; 22(4):29-32. (rus).

Поступила 08.04.2024, после доработки 02.02.2025;
принята к публикации 04.02.2024

Received April 8, 2024; Received in revised form February 2, 2025;

Accepted February 4, 2025

Информация об авторах

КРАСИЛЬНИКОВА Маргарита Александровна, научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; AuthorID: 656764; ResearcherID: 56685388300; ORCID: 0000-0002-3103-4719; e-mail: krasilnikova79@mail.ru

БАРБИН Николай Михайлович, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник учебно-научного комплекса пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22; AuthorID: 31647; ResearcherID: 6701448034; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

Вклад авторов:

Красильникова М.А. — постановка целей и задач научного исследования; подборка методик, в соответствии с которыми проводилось научное исследование; участие в получении и обработке экспериментального материала.

Барбин Н.М. — научное руководство; концепция исследования; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Margarita A. KRASILNIKOVA, Researcher of the Research Department, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; AuthorID: 656764; Researcher ID: 56685388300; ORCID: 0000-0002-3103-4719; e-mail: krasilnikova79@mail.ru

Nikolay M. BARBIN, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading researcher of the educational and scientific complex of fire extinguishing and emergency rescue operations, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Mira St., 22, Ekaterinburg, 620062, Russian Federation; AuthorID: 31647; ResearcherID: 6701448034; ORCID: 0000-0002-6709-4334; e-mail: nmbarbin@mail.ru

Contribution of the authors:

Krasilnikova M.A. — setting the goals and objectives of the scientific research; selection of methods, according to which the scientific research was conducted; participation in obtaining and processing of experimental material.

Barbin N.M. — scientific guidance; research concept; finalization of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.