

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 197–205.

Forests of Russia and economy in them. 2025. № 4 (95). P. 197–205.

Научная статья

УДК 678.7:620.1:661.63:691.175

DOI: 10.51318/FRET.2025.95.4.019

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСНО НАПОЛНЕННОГО ПВХ С АНТИПИРЕНОМ, ПОЛУЧЕННЫМ АМИНОЛИЗОМ ПЭТФ

М. А. Красильникова¹, А. А. Баёв², М. Н. Тухбатулин³,
А. Е. Шкуро⁴, А. В. Артемов⁵

^{1–3} Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России,
Екатеринбург, Россия

^{4,5} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шкуро Алексей Евгеньевич,
shkuroae@m.usfeu.ru

Аннотация. В данной работе исследуется влияние антипирена, полученного на основе продуктов аминотерминации полиэтилентерефталата (ПЭТФ), на термическое разложение древесно наполненного поливинилхлорида (ПВХ). В ходе исследования были изготовлены образцы древесно наполненного ПВХ с различным содержанием антипирена и подвергнуты термическому анализу методом инфракрасной спектроскопии с целью выявления изменений в составе продуктов разложения. Проведен анализ зольного остатка для оценки влияния антипирена на удержание хлора и формирование остаточных структур. Результаты исследования показали, что введение антипирена изменяет механизм термического разложения древесно наполненного ПВХ, снижая интенсивность выделения хлороводорода, и увеличивает содержание хлора в золе. В спектрах ИК-спектроскопии отмечено увеличение интенсивности пиков, характерных для виниловых эфиров и алифатических соединений, а также снижение интенсивности полос, относящихся к ароматическим структурам. Обнаружены нелинейные изменения в концентрации карбонильных соединений в зависимости от содержания антипирена, что свидетельствует о сложном механизме его воздействия. Таким образом, антипирен на основе продуктов аминотерминации ПЭТФ не только снижает горючесть древесно наполненного ПВХ, но и существенно изменяет состав продуктов его термического разложения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых рецептур огнестойких полимерных композитов с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: композит, ПВХ, древесная мука, антипирен, аминотерминация ПЭТФ, огнезащита, продукты разложения, ИК-спектроскопия

Для цитирования: Исследование продуктов разложения древесно наполненного ПВХ с антипиреном, полученным аминотерминацией ПЭТФ / М. А. Красильникова, А. А. Баёв, М. Н. Тухбатулин [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 197–205.

Original article

RESEARCH OF DECOMPOSITION PRODUCTS OF WOOD-FILLED PVC WITH FIRE RETARDANT PRODUCED BY AMINOLYSIS OF PET

Margarita A. Krasilnikova¹, Alexander A. Baev², Maxim N. Tukhbatulin³,
Alexey E. Shkuro⁴, Artyom V. Artyomov⁵

¹⁻³ Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Yekaterinburg, Russia

^{4,5} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Alexey E. Shkuro,
shkuroae@m.usfeu.ru

Abstract. In this work, the effect of a fire retardant obtained on the basis of polyethylene terephthalate (PET) aminolysis products on the thermal decomposition of wood-filled polyvinyl chloride (PVC) is investigated. In the course of the research, samples of wood-filled PVC with different fire retardant contents were prepared and subjected to thermal analysis using infrared spectroscopy in order to detect changes in the composition of the decomposition products. An analysis of the ash residue was carried out to assess the effect of the fire retardant on chlorine retention and the formation of residual structures. The results of the research showed that the introduction of the fire retardant changes the mechanism of thermal decomposition of wood-filled PVC, reducing the intensity of hydrogen chloride release and increasing the chlorine content in the ash. An increase in the intensity of peaks characteristic of vinyl esters and aliphatic compounds, as well as a decrease in the intensity of belts related to aromatic structures were noted in the IR spectroscopy spectra. Nonlinear changes in the concentration of carbonyl compounds depending on the content of the fire retardant were found, which indicates a complex mechanism of its action. Thus, the fire retardant based on the products of PET aminolysis not only reduces the flammability of wood-filled PVC, but also significantly changes the composition of the products of its thermal decomposition. The results obtained can be used to develop new formulations of fire resistant polymer composites with improved characteristics.

Keywords: composite, PVC, wood flour, fire retardant, PET aminolysis, fire protection, decomposition products, IR spectroscopy

For citation: Research of decomposition products of wood-filled PVC with fire retardant produced by aminolysis of PET / M. A. Krasilnikova, A. A. Baev, M. N. Tukhbatulin [et al.] // Forests of Russia and economy of them. 2025. № 4 (95). P. 197–205.

Введение

Поливинилхлорид (ПВХ) является одним из наиболее широко используемых синтетических термопластичных полимеров и занимает второе место среди полимерных материалов, применяемых в производстве древесно-полимерных композитов (ДПК) после полиэтилена (Mechanical and Processing..., 2024). Такое распространение обусловлено его высокой механической прочностью, жесткостью, устойчивостью к погодным условиям

и относительно низкой стоимостью (Lewandowski, Skorczewska, 2022). Существенным недостатком ПВХ является его пожарная опасность. Введение в состав ДПК древесной муки значительно снижает огнестойкость материала, что делает необходимым использование специальных антипиренов (Стойкость..., 2022).

Антипирены представляют собой широкий класс добавок, препятствующих горению. Среди них выделяют галогенсодержащие соединения,

фосфорсодержащие вещества, минеральные наполнители и вспучивающиеся покрытия. Однако при их применении важно учитывать влияние на физико-механические свойства ПВХ, так как некоторые антипирены могут ухудшать прочность, ударную вязкость или гибкость материала (Добавки для понижения..., 2022). В связи с этим особый интерес представляют антипирены, полученные на основе продуктов деструкции синтетических полимеров, таких как полиуретан, поликарбонат и полиэтилентерефталат (ПЭТФ) (Ислентьев, Балакин, 2016; Балакин, Галлямов, 2015; Сравнительная оценка..., 2013; Огнезащитные составы..., 2012).

Продукты аминолитиза ПЭТФ являются перспективным сырьем для создания эффективных антипиренов. Они могут быть фосфорилированы по реакции Кабачника – Филдса с получением фосфорорганических соединений, обладающих выраженными огнезащитными свойствами (Огнезащитные составы..., 2012). Экспериментальные исследования показали, что применение таких составов при обработке древесины смещает температурный диапазон её разложения, способствует дегидратации и карбонизации, а также формированию защитного слоя угля, препятствующего быстрому распространению огня.

Важной задачей является детальное изучение механизма действия антипиренов на основе продуктов аминолитиза ПЭТФ при их внедрении в состав ДПК с полимерной фазой ПВХ. Включенные в состав данных антипиренов амиды терефталевой кислоты могут не только повышать огнестойкость материала, но и оказывать пластифицирующий эффект, улучшая распределение наполнителя в полимерной матрице. Комплексное исследование их термического поведения, взаимодействия с компонентами ПВХ и влияния на формирование защитных углеродных структур позволит разработать новые эффективные огнезащитные системы для древесно-полимерных композитов, обеспечивая их безопасность и долговечность.

Цель исследования – изучение влияния антипирена на основе продуктов аминолитиза ПЭТФ на термическое разложение древесно наполненного

ПВХ с анализом остаточного состава золы и изменений в функциональных группах по данным ИК-спектроскопии.

Задачи исследования:

- получение образцов древесно наполненного ПВХ с различным содержанием антипирена;
- анализ термического разложения образцов методом ИК-спектроскопии для выявления изменений в составе продуктов разложения;
- исследование зольного остатка с целью определения влияния антипирена на удержание хлора и формирование остаточных структур;
- выявление закономерностей изменения содержания в золе функциональных групп в зависимости от концентрации антипирена;
- оценка эффективности антипирена с точки зрения снижения горючести и влияния на механизм разложения древесно наполненного ПВХ.

Объекты

и методика исследований

Для получения образцов древесно наполненного ПВХ использовали суспензионный поливинилхлорид марки SG-5 (ТУ 2212-012-46696320–2008) и древесную муку марки 180 (ДМ, ГОСТ 16361–87). В качестве пластификаторов – дибутилфталат (ДБФ, ГОСТ 8728–77) и трибутилфосфат (ТБФ, ТУ 2435-305-05763458–2001). Для повышения огнестойкости образцов древесно наполненного ПВХ был использован антипирен, полученный фосфорилированием продуктов аминолитиза ПЭТФ согласно методике, изложенной в работе (Огнезащитные составы..., 2012). Смешение компонентов проводилось методом вальцевания при температуре 170–175 °С. Рецептуры образцов древесно наполненного ПВХ приведены в табл. 1.

Из полученных методом вальцевания листов вырезались стандартные образцы для испытаний на огнестойкость (рис. 1). Испытаниям подвергаются образцы, не имеющие вздутий, трещин, сколов, раковин, зазубрин, заусенцев и отверстий. Край образцов должны быть гладкими, радиус закругления углов не должен превышать 1,3 мм.

Образцы подвергались испытаниям на огнестойкость согласно методике, изложенной в работе

(Красильникова и др., 2025). Затем нижнюю часть образца, наиболее подвергшуюся воздействию пламени в ходе эксперимента, срезали на расстоянии 2 см от нижней границы. После охлаждения жидким азотом до температуры ниже температуры хрупкости материал измельчали в агатовой ступке до порошкообразного состояния. Полученный порошок прессовали с бромидом калия в таблетки,

которые затем анализировали методом ИК-спектроскопии.

Изучение химического состава продуктов термического разложения образцов древесно наполненного ПВХ проводилось с использованием метода инфракрасной спектроскопии на лабораторном инфракрасном Фурье-спектрометре марки ФСМ-2203.

Таблица 1
Table 1

Рецептуры образцов древесно наполненного ПВХ
Wood-filled PVC sample recipes

№	Содержание компонента, мас. ч. Component content, pts. wt.					Содержание антипирена, мас. % Fire retardant content, wt. %
	ПВХ PVC	ДБФ DBP	ТБФ TBP	ДМ WF	Антипирен Fire retardant	
1	100	15	10	25	0,0	0,0
2	100	15	10	25	5,0	3,2
3	100	15	10	25	10,0	6,3
4	100	15	10	25	15,0	9,1
5	100	15	10	25	20,0	11,8

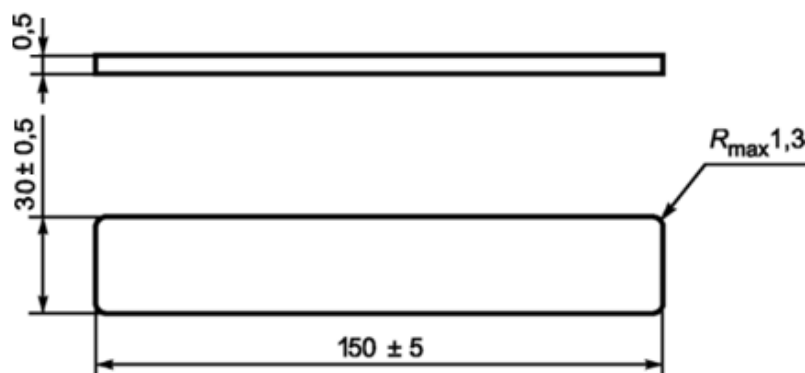


Рис. 1. Образец для испытаний на огнестойкость
Fig. 1. Fire resistance test sample

Результаты и их обсуждение

ИК-Фурье спектры золы образцов древесно наполненного ПВХ представлены на рис. 2. Интенсивность характеристических пиков и их интерпретация приведены в табл. 2.

В результате введения антипирена в состав древесно наполненного ПВХ (степень наполнения порядка 30 мас. %) были получены четыре ком-

позиции, содержащие 0, 3,2, 6,3, 9,1 и 11,8 мас. % антипирена. Образцы подверглись воздействию пламени, после чего был проведен анализ состава золы и ИК-спектроскопия остатков. Установлено, что с увеличением содержания антипирена возрастает содержание хлора в золе, а также наблюдаются изменения в интенсивности ряда характерных полос в ИК-спектрах.

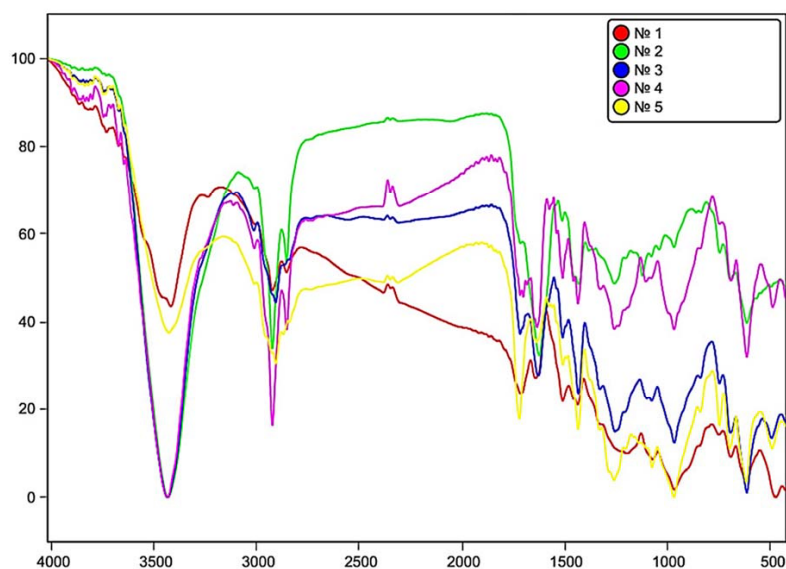


Рис. 2. ИК-спектры золы образцов древесно наполненного ПВХ
Fig. 2. IR spectra of ash from wood-filled PVC samples

Таблица 2
Table 2

Интенсивность характеристических пиков и их интерпретации
Intensity of characteristic peaks and their interpretation

№	Максимум, см ⁻¹ Maximum, cm ⁻¹	Интерпретация Interpretation	Относительная площадь пика для образца композита Relative peak area for composite sample				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
1	610	Хлор Chlorine	1,0	1,1	2,1	1,2	1,8
2	964	Деформационные колебания =C–H (характерны для винильных соединений, алкенов) Deformation vibrations =C–H (characteristic of vinyl compounds, alkenes)	2,1	–	2,9	–	3,4
3	1072	Хлор/Валентные колебания C–O (характерны для эфиров, спиртов, сложных эфиров) Chlorine/stretching vibrations C–O (characteristic of ethers, alcohols, esters)	–	–	–	–	0,2
4	1435	Деформационные колебания C–H в CH ₂ -группах (характерны для алканов, алкильных групп) Deformation vibrations of C–H in CH ₂ groups (characteristic of alkanes, alkyl groups)	0,2	0,3	1,4	0,7	1,7
5	1508	Колебания C=C в ароматических кольцах (характерны для бензольных соединений) C=C vibrations in aromatic rings (characteristic of benzene compounds)	0,9	–	–	–	–
6	1714	Валентные колебания C=O (характерны для кетонов, альдегидов, сложных эфиров, карбоновых кислот) Stretching vibrations of C=O (characteristic of ketones, aldehydes, esters, carboxylic acids)	1,4	0,7	0,9	0,2	3,5
7	2925	Валентные колебания C–H в группах CH, CH ₂ и CH ₃ (характерны для алканов, алифатических соединений) Stretching vibrations of C–H in CH, CH ₂ and CH ₃ groups (characteristic of alkanes, aliphatic compounds)	1,2	4,3	1,8	1,7	–

Рост содержания хлора в золе при увеличении концентрации антипирена может быть объяснен изменением механизма термического разложения древесно наполненного ПВХ. В обычных условиях при нагревании ПВХ выделяет хлороводород, который уходит в газовую фазу. Однако антипирен может стабилизировать разложение, способствуя увеличению содержания хлора в непрогоревшем остатке. Это может быть связано с подавлением дегидрохлорирования ПВХ, формированием термостойких хлорсодержащих соединений и каталитическим воздействием антипирена, изменяющим механизм разложение макромолекул ПВХ.

В ИК-спектрах также наблюдается рост интенсивности полос, характерных для виниловых эфиров. Это может быть связано с тем, что антипирен изменяет путь разложения древесно наполненного ПВХ, подавляя процессы дегидрохлорирования и ароматизации. В результате образуется больше кислородсодержащих соединений, таких как виниловые эфиры. Возможные причины включают каталитическое воздействие антипирена, способствующее образованию эфиров, ингибирование образования полиеновой цепи и реакции между разлагающимся ПВХ и продуктами распада антипирена.

С увеличением содержания антипирена возрастает интенсивность пиков, характерных для деформационных колебаний связи C–H в CH_2 -группах ($1400\text{--}1450\text{ см}^{-1}$). Это свидетельствует о росте доли насыщенных алифатических структур в продуктах разложения древесно наполненного ПВХ. Причины этого явления могут включать подавление дегидрохлорирования, изменение пути разложения ПВХ, приводящее к образованию алкильных фрагментов, а также радикальные реакции разрыва цепей, увеличивающие долю насыщенных углеводородов.

С увеличением концентрации антипирена наблюдается исчезновение полосы 1508 см^{-1} , характерной для колебаний C=C в ароматических кольцах. Это указывает на снижение количества ароматических структур в продуктах разложения, что согласуется с увеличением доли алифатических соединений. Это объясняется подавлением дегидрохлорирования и последующей ароматиза-

ции, снижением выхода полиенов, которые являются предшественниками ароматических систем, и изменением пути термического разложения в сторону насыщенных фрагментов.

В области 1710 см^{-1} , характерной для карбонильных соединений (альдегиды, карбоновые кислоты, сложные эфиры), интенсивность пика сначала высокая, затем падает, а при максимальном содержании антипирена снова возрастает. Такой нелинейный характер изменений может быть объяснен следующим образом: при низком содержании антипирена идет окислительное разложение, формируется значительное количество карбонильных соединений; при среднем содержании антипирена он стабилизирует разложение, снижая долю кислородсодержащих продуктов и уменьшая интенсивность C=O пика; при высоком содержании антипирена он сам участвует в реакциях, катализируя образование карбонильных соединений, что снова увеличивает интенсивность пика.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение антипирена на основе продуктов аминнолиза ПЭТФ в состав древесно наполненного ПВХ значительно изменяет механизм его термического разложения. Основные наблюдаемые эффекты включают:

- снижение интенсивности выделения хлороводорода и увеличение содержания хлора в золе;
- рост интенсивности пиков, характерных для виниловых эфиров, объясняемый изменением пути разложения ПВХ;
- увеличение доли алифатических соединений, что подтверждается ростом CH_2 -групп;
- подавление образования ароматических структур и нелинейное изменение содержания карбонильных соединений, зависящее от концентрации антипирена.

Таким образом, применение антипирена на основе продуктов аминнолиза ПЭТФ не только снижает горючесть древесно наполненного ПВХ, но и значительно меняет состав продуктов его разложения. Понимание механизма действия огнезащитной добавки необходимо для оптимизации рецептур огнестойких полимерных композиций.

Выводы

1. Исследование показало, что антипирен на основе продуктов аминолита ПЭТФ изменяет механизм термического разложения древесно наполненного ПВХ. С увеличением содержания антипирена снижается интенсивность выделения хлороводорода и возрастает содержание хлора в продуктах разложения поливинилхлорида.

2. Кроме того, ИК-спектроскопия выявила рост полос, характерных для виниловых эфиров и алифатических структур, а также уменьшение интенсивности пиков, характерных для ароматических соединений (1508 см^{-1}), что свидетельствует о подавлении процессов дегидрохлорирования

и ароматизации продуктов разложения ПВХ. Интенсивность полосы с максимумом в области 1710 см^{-1} , связанная с присутствием в соединении карбонильной группы, изменяется нелинейно, достигая максимума при наибольшем содержании антипирена.

3. Продукты аминолита ПЭТФ эффективны, как антипирены для древесно наполненного ПВХ, снижают образование летучих хлорсодержащих соединений и ароматических структур, а также способствуют формированию термостойких остатков. Полученные данные могут быть полезны для разработки огнестойких полимерных материалов.

Список источников

- Балакин В. М. Галлямов А. А. Синтез и свойства азотфосфорсодержащих огнезащитных составов на основе продуктов аминолита полиуретанов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 7 (164). С. 135–138.
- ГОСТ 16361–87. Мука древесная. Технические условия : Государственный стандарт. М. : Изд-во стандартов, 1987. 7 с.
- ГОСТ 8728–77. Пластификаторы. Технические условия : Государственный стандарт. М. : Изд-во стандартов, 1977. 12 с.
- Добавки для понижения горючести полимеров / И. И. Зарипов, И. Н. Вихарева, Е. А. Буйлова [и др.] // Нанотехнологии в строительстве : науч. интернет-журнал. 2022. Т. 14, № 2. С. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
- Ислентьев С. В., Балакин В. М. Фосфорсодержащая огнезащитная композиция для древесных материалов на основе азотсодержащих продуктов деструкции поликарбоната моноэтаноламина // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 4 (183). С. 113–120.
- Красильникова М. А., Баёв А. А., Шкуро А. Е. Получение огнестойких древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // Деревообрабатывающая промышленность. 2025. № 1. С. 45–53.
- Lewandowski K., Skórczewska K. A Brief Review of Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Recycling // Polymers. 2022. Vol. 14. P. 3035.
- Mechanical and Processing Properties of Plasticized PVC/Wood Composites / K. Lewandowski, P. Altmajer, Z. Borkowska, K. Skórczewska // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 2204. DOI: 10.3390/polym16152204
- Огнезащитные составы для древесины на основе продуктов аминолита диаминами и полиаминами / М. А. Красильникова, В. М. Балакин, А. В. Стародубцев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 2. С. 27–30.
- Сравнительная оценка огнезащитных свойств фосфорсодержащих антипиренов на основе продуктов аминолита полиэтилентерефталата / М. А. Красильникова, В. М. Балакин, А. В. Стародубцев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22, № 4. С. 29–31.
- Стойкость древесно-полимерных композитов к горению / С. Ф. Мельников, В. М. Шаповалов, К. В. Овчинников [и др.] // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 3. С. 42–48. DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-3-42-48

TU 2212-012-46696320–2008. Поливинилхлорид суспензионный «Саянский». URL: <https://docs.cntd.ru/document/415961671> (дата обращения: 01.04.2025).

TU 2435-305-05763458–01. Трибутилфосфат технический. URL: <https://www.nvah.ru/page12939.html> (дата обращения: 01.04.2025).

References

- Additives for reducing the flammability of polymers / *I. I. Zaripov, I. N. Vikhareva, E. A. Buylova* [et al.] // Nanotechnology in construction: scientific online journal. 2022. Vol. 14, № 2. P. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161 (In Russ.)
- Balakin V. M., Gallyamov A. A.* Synthesis and properties of nitrogen-phosphorus-containing fire retardant compositions based on polyurethane aminolysis products // Bulletin of the Volgograd State Technical University. 2015. № 7 (164). P. 135–138. (In Russ.)
- Comparative assessment of fire retardant properties of phosphorus-containing fire retardants based on polyethylene terephthalate aminolysis products / *M. A. Krasilnikova, V. M. Balakin, A. V. Starodubtsev* [et al.] // Fire and explosion safety. 2013. Vol. 22, № 4. P. 29–31. (In Russ.)
- Fire Resistance of Wood-Polymer Composites / *S. F. Melnikov, V. M. Shapovalov, K. V. Ovchinnikov* [et al.] // Polymer Materials and Technologies. 2022. Vol. 8, № 3. P. 42–48. DOI: 10.32864/polymmattech-2022-8-3-42-48 (In Russ.)
- Fire retardant compositions for wood based on aminolysis products with diamines and polyamines / *M. A. Krasilnikova, V. M. Balakin, A. V. Starodubtsev* [et al.] // Fire and explosion safety. 2012. Vol. 21, № 2. P. 27–30. (In Russ.)
- GOST 16361–87. Wood flour. Technical specifications : State standard. Moscow : Publishing House of standards, 1987. 7 p.
- GOST 8728–77. Plasticizers. Technical specifications : State standard. Moscow : publishing House of standards, 1977. 12 p.
- Isentyev S. V., Balakin V. M.* Phosphorus-containing fire retardant composition for wood materials based on nitrogen-containing products of polycarbonate degradation by monoethanolamine // Bulletin of the Volgograd State Technical University. 2016. № 4 (183). P. 113–120. (In Russ.)
- Krasilnikova M. A., Baev A. A., Shkuro A. E.* Production of fire resistant wood-polymer composites based on polyvinyl chloride // Woodworking industry. 2025. № 1. P. 45–53. (In Russ.)
- Lewandowski K., Skórczewska K.* A Brief Review of Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Recycling // Polymers. 2022. Vol. 14. P. 30–35.
- Mechanical and Processing Properties of Plasticized PVC/Wood Composites / *K. Lewandowski, P. Altmajer, Z. Borkowska, K. Skórczewska* // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 2204. DOI:10.3390/polym16152204
- TU 2212-012-46696320–2008. Polyvinyl chlorid suspension “Sayansky”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/415961671> (accessed 01.04.2025).
- TU 2435-305-05763458–01. Technical tributyl phosphate. URL: <https://www.nvah.ru/page12939.html> (accessed 01.04.2025).

Информация об авторах

Маргарита Александровна Красильникова – научный сотрудник,
krasilnikova79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3103-4719>

Александр Александрович Баёв – адъюнкт 1 года обучения,
pancho.99@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1121-6360>

Максим Наильевич Тухбатулин – адъюнкт 2 года обучения,
tuchbatulin93@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4586-1143>

Алексей Евгеньевич Шкуро – доктор технических наук, доцент,
shkuroae@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>

Артем Вячеславович Артемов – кандидат технических наук, доцент.
artemoav@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>

Information about the authors

Margarita A. Krasilnikova – scientific associate,
krasilnikova79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3103-4719>

Alexander A. Baev – adjunct of the 1st year of study,
pancho.99@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1121-6360>

Maxim N. Tukhbatulin – adjunct of the 2nd year of study,
tuchbatulin93@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4586-1143>

Alexey E. Shkuro – Doctor of technical Sciences, Associate Professor,
shkuroae@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4016-2269>

Artem V. Artemov – Candidate of technical Sciences, Associate Professor.
artemoav@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>

Статья поступила в редакцию 10.04.2025; принята к публикации 30.04.2025.

The article was submitted 10.04.2025; accepted for publication 30.04.2025.
