

УДК 614.84:678.5

ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БРОМИРОВАННОЙ НОВОЛАЧНОЙ КАРДАНОЛЬНОЙ СМОЛОЙ

Баёв Александр Александрович¹, Шкуро Алексей Евгеньевич², Пазникова Светлана Николаевна¹

¹ Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация. В работе исследована огнезащитная эффективность бромированной новолачной карданольной смолы в древесно-полимерных композитах на основе полиэтилена низкого давления. Высокая горючесть традиционных древесно-полимерных композитов ограничивает их применение в строительстве, что обуславливает поиск возобновляемых антипиренов. Композиты с содержанием бромированной новолачной карданольной смолы, варьируемым в интервале от 0 до 12,5 мас. %, изготавливались методами вальцевания и горячего прессования. Огнезащитное действие бромированной новолачной карданольной смолы оценивали по потере массы, длине прогоревшей части, скорости распространения пламени, наличию горящих капель и структурной целостности образца. Установлено, что оптимальная концентрация модификатора составляет 9,6 мас. %. При этом потеря массы снижается с 65 до 6,8 %, длина поврежденной зоны уменьшается с 150 до 5,5 мм, а скорость распространения пламени сокращается с 28,6 до 9,7 мм/мин. Образование воспламеняющихся капель и разрушение исследуемых образцов были полностью исключены в рамках проведения эксперимента. Результаты проведенного исследования демонстрируют высокую эффективность бромированной новолачной карданольной смолы в качестве экологически ориентированного антипирена для разработки пожаробезопасных древесно-полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: древесно-полимерные композиты, полиэтилен низкого давления, бромированная новолачная карданольная смола, огнезащитная эффективность, горючесть, потеря массы, скорость распространения пламени, антипирены биогенного происхождения

Для цитирования: Баёв А. А., Шкуро А. Е., Пазникова С. Н. Древесно-полимерные композиты пониженной горючести, модифицированные бромированной новолачной карданольной смолой // Техносферная безопасность. 2026. № 3 (52). С. 91–100.

LOW-FLAMMABILITY WOOD-POLYMER COMPOSITES MODIFIED WITH BROMINATED NOVOLAC CARDANOL RESIN

Alexander A. Baev¹, Alexey E. Shkuro², Svetlana N. Paznikova¹

¹ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This study investigated the fire-retardant efficacy of brominated novolac cardanol resin in wood-polymer composites based on low-density polyethylene. The high flammability of traditional wood-polymer composites limits their use in construction, necessitating the search for renewable flame retardants. Composites with brominated novolac cardanol resin contents ranging from 0 to 12.5 wt. % were manufactured using rolling and hot-pressing methods. The fire-retardant performance of brominated novolac cardanol resin was assessed based on mass loss, burnt-out length, flame propagation velocity, the presence of burning droplets, and the structural integrity of the sample. The optimal modifier concentration was found to be 9.6 wt. %. Moreover, mass loss is reduced from 65 to 6.8 %, the damaged zone length is shortened from 150 to 5.5 mm, and the flame propagation rate is reduced from 28.6 to 9.7 mm/min. The formation of burning droplets and sample failure is completely eliminated. The study results confirm the high effectiveness of brominated novolac cardanol resin as an environmentally friendly flame retardant for the creation of fire-resistant wood-polymer composite materials.

Keywords: wood-plastic composites, low-density polyethylene, brominated novolac cardanol resin, fire retardant performance, flammability, weight loss, flame spread rate, biogenic flame retardants

For citation: Baev A. A., Shkuro A. E., Paznikova S. N. Low-flammability wood-polymer composites modified with brominated novolac cardanol resin // *Technospheric safety*. 2026. No. 3 (52). P. 91–100.

Введение

Древесно-полимерные композиты (ДПК) получили широкое распространение в строительстве, интерьерной отделке и мебельном производстве благодаря удачному сочетанию эстетики натуральной древесины с технологичностью, влагостойкостью и долговечностью термопластичных матриц [1–3]. Тем не менее внедрение ДПК в ответственные инженерные и строительные конструкции существенно ограничено их высокой пожарной опасностью. Горючесть композитов обусловлена синергетическим характером термического разложения компонентов: древесный наполнитель выступает в роли капиллярного фитиля, а полимерная фаза (преимущественно полиэтилен или полипропилен) при деградации генерирует значительные объемы тепла и легковоспламеняющихся летучих соединений [4].

Для снижения пожарной опасности ДПК традиционно применяются интумесцентные системы на основе полифосфата аммония (ПФА), галогенсодержащие антипирены и минеральные наполнители. ПФА проявляет высокую активность в конденсированной фазе, катализируя дегидратацию целлюлозы и формирование термостабильного углеродного барьера. Однако достижение требуемых показателей огнестойкости требует высоких концентраций добавки (обычно > 20 мас. %), что приводит к существенному ухудшению прочностных характеристик и реологических свойств расплава при переработке. Галогенированные антипирены, напротив, эффективны в газовой фазе даже при низких дозировках, но их применение сдерживается ужесточением экологических норм, экотоксичностью продуктов разложения и коррозионной активностью выделяющихся галогеноводородов.

В качестве экологически ориентированной и технологически совместимой альтернативы рассматриваются модифицированные продукты биогенного происхождения, в частности бромированная карданольная новолачная смола (БНКС) [5–8]. Сырьевой базой для ее синтеза служит карданол — возобновляемый фенольный компонент, извлекаемый из околоплодников орехов кешью и характеризующийся наличием реакционноспособной гидроксильной группы и ненасыщенной углеводородной цепи [9]. Карданол и его производные широко используются в производстве смол, клеев, защитных покрытий и фармацевтических субстанций. Введение брома в структуру новолачной смолы (рис. 1) позволяет реализовать газофазный механизм ингибирования горения за счет высвобождения активных радикалов, а ароматический каркас способствует интенсивному коксообразованию в конденсированной фазе [6].

Экспериментальные данные подтверждают высокую огнезащитную активность

бромированных производных карданола. Обработка древесно-стружечных плит (ДСП) низкомолекулярными бромированными аналогами обеспечивает высший класс огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53292–2009, однако сопровождается выделением токсичных газов (HBr , CO_2) и рядом стойких органических загрязнителей [10, 11]. Переход к высокомолекулярной бромированной новолачной карданольной смоле позволяет существенно снизить негативные эффекты. Потеря массы образцов ДСП после огневых испытаний составляет всего 4 % (против 71 % для эталона), время самостоятельного горения сокращается до 63 с, при этом смола одновременно выполняет функции связующего и антипирена [6]. При введении БНКС в композиты на основе ПВХ и древесной муки оптимальная дозировка составляет 6 мас. %, что обеспечивает двукратное уменьшение времени горения, снижение потери массы на 30 % и сокращение зоны термического разрушения на 20 % [10].

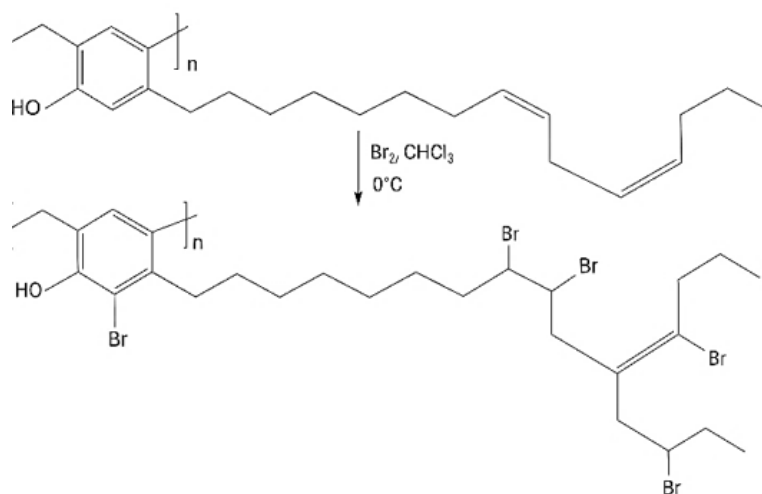


Рис. 1. Реакция бромирования карданольной новолачной смолы

Fig. 1. Bromination reaction of cardanol novolac resin

Хотя эффективность совместного применения БНКС и традиционных интумесцентных систем (например, ПФА) доказана, этот

подход требует тщательного исследования. С одной стороны, сочетание газофазного радикального замедления и барьерного

действия коксового слоя может усилить их воздействие. С другой стороны, кислотные продукты разложения ПФА могут вызвать преждевременное разрушение смоляной матрицы, а летучие броморганические соединения — дестабилизировать формирующийся вспученный интумесцентный слой. Кроме того, влияние концентрации БНКС на комплекс физико-механических свойств ДПК, изготовленных на основе полиолефинов, остается недостаточно изученным.

Цель работы — определить показатели огнезащитной эффективности бромированной новолачной карданольной смолы в древесно-полимерных композитах на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД), включая количественную оценку потери массы, геометрических параметров повреждений образца и кинетики распространения пламени.

Методическая часть

В качестве полимерной матрицы для получения древесно-полимерных композитов использован полиэтилен низкого давления марки 273 (ТУ 2243-104-00203335–2005). Наполнителем служила древесная мука марки 180 (ГОСТ 16361–87) с дисперсностью частиц, обеспечивающей однородное распределение в полимерной фазе. Функцию огнезащитного модификатора выполняла бромированная новолачная карданольная смола, характеризующаяся следующими параметрами: среднемассовой молекулярной массой $M_w = 4\,056$ г/моль, среднечисловой молекулярной массой $M_n = 1\,792$ г/моль, индексом полидисперсности $M_w / M_n = 2,26$, динамической вязкостью 62100 мПа·с (75 °С), содержанием связанного брома 52,8 мас. %.

Для реализации синергетического огнезащитного эффекта в состав композитов дополнительно вводили компоненты классической интумесцентной системы: ПФА в качестве кислотного источника, катализирующего дегидратацию целлюлозы и образование угольного кокса; пентаэритрит (ПЭ) как углеводородный источник, формирующий пористую структуру вспученного слоя; оксид сурьмы (III) в качестве синергиста галогенсодержащих антипиренов, усиливающего газофазное ингибирование за счет образования летучих бромидов сурьмы.

Гомогенизацию компонентов осуществляли на смесительных вальцах ПД-320-160/160 при температуре 180 °С. Формование образцов для испытаний проводили методом горячего прессования при температуре 170 °С и давлении 5 МПа с последующим контролируемым охлаждением в пресс-форме. Составы исследуемых композитов с варьированием содержания БНКС представлены в таблице 1.

Огнезащитное действие БНКС на образцах композитов оценивали по комплексу показателей, определяемых в ходе испытаний на горючесть в соответствии с ГОСТ Р 53292–2009: количественно фиксировали потерю массы образцов после огневого воздействия (мас. %), длину прогоревшей части (мм) и скорость распространения пламени (мм/мин), рассчитываемую по времени прохождения фронтом горения калиброванного участка. Дополнительно проводили качественную оценку наличия горящих капель расплава и структурного разрушения образцов (растрескивание, расслоение, обугливание) с указанием частоты проявления данных признаков в серии из пяти параллельных испытаний для каждого состава.

Таблица 1
Составы исследованных композитов
 Table 1
 Formulations of the studied composites

№	Содержание компонента, масс. % Component content, mass. %					
	ПЭНД HDPE	Древесная мука Wood flour	ПФА PFA	Пентаэритрит Pentaerythritol	Оксид сурьмы Antimony oxide	БНКС BNCR
1	44,4	35,6	13,3	4,4	2,2	0
2	42,9	34,3	12,9	4,3	2,1	3,4
3	41,5	33,2	12,4	4,1	2,1	6,6
4	40,2	32,1	12,0	4,0	2,0	9,6
5	38,9	31,1	11,7	3,9	1,9	12,5

Анализ результатов

Результаты испытаний на горючесть, представленные в табл. 2, демонстрируют выраженную зависимость огнезащитных характеристик композитов от содержания бромированной новолачной карданольной смолы.

Введение БНКС даже в минимальной концентрации (3,4 мас. %) обеспечивает десятикратное снижение потери массы и сокращение длины поврежденной зоны более чем в 2 раза по сравнению с немодифицированным композитом. При содержании БНКС $\geq 6,6$ мас. % полностью исключаются образование горящих капель и структурное разрушение образцов, что свидетельствует о стабилизации конденсированной фазы при горении. Оптимальные показатели достигнуты при дозировке 9,6 мас. %: минимальная потеря массы — 6,8 %, наименьшая длина прогара — 5,5 мм и мини-

мальная скорость распространения пламени — 9,7 мм/мин. Дальнейшее увеличение концентрации до 12,5 мас. % не приводит к существенному улучшению большинства параметров, а некоторое возрастание скорости распространения пламени (до 19,3 мм/мин) может быть связано с изменением реологии расплава и дисперсности наполнителя в системе.

На основе экспериментальных данных установлены закономерности изменения показателей горючести образцов ДПК в зависимости от содержания БНКС. Графическая интерпретация этих зависимостей приведена на рис. 2–4.

Комплексная оценка огнезащитной эффективности БНКС показывает, что введение модификатора в концентрации 9,6 мас. % обеспечивает оптимальное снижение всех ключевых показателей пожарной опасности ДПК на основе ПЭНД: потеря массы сокращается в 9,6 раза, длина прогоревшей

зоны — в 27 раз, скорость распространения пламени — в 2,9 раза, при этом полностью исключается образование горящих капель и структурное разрушение. Дальнейшее увеличение дозировки БНКС не дает суще-

ственного прироста эффективности, что позволяет рекомендовать концентрацию 9,6 мас. % в качестве оптимальной для разработки составов ДПК с пониженной горючестью.

Таблица 2
Результаты испытаний
Table 2
Test results

Номер образца в плане Number sample in the plan	1	2	3	4	5
Содержание БНКС, масс. % Content of BNCR, mass. %	0,0	3,4	6,6	9,6	12,5
Потеря массы после испытаний на горючесть, масс. % Mass loss after combustion tests, mass. %	65,0	15,7	16,7	6,8	5,8
Длина прогоревшей части образца, мм Length of the burnt part of the sample, mm	150,0	61,3	31,4	5,5	7,0
Скорость распространения пламени, мм/мин Flame propagation velocity, mm/min	28,6	12,9	13,6	9,7	19,3
Горящие капли Burning drops	да (1/5) yes (1/5)	да (1/5) yes (1/5)	нет no	нет no	нет no
Разрушение образца Destruction of the sample	да (4/5) yes (4/5)	нет no	нет no	нет no	нет no

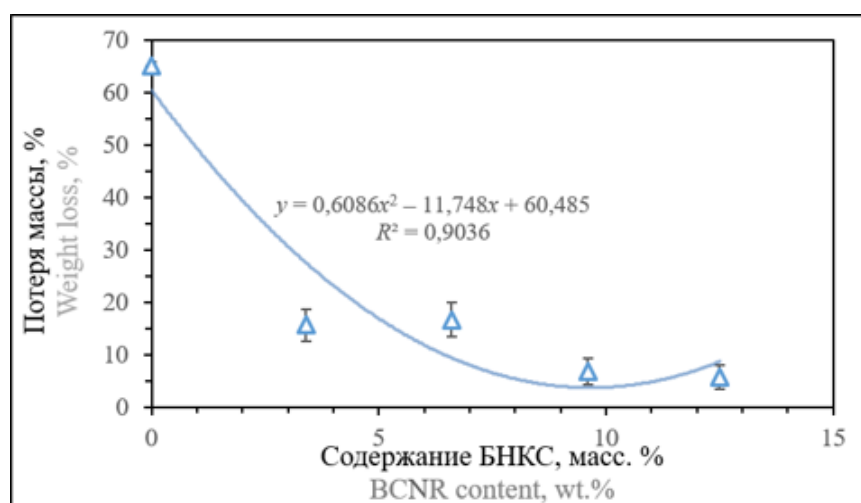


Рис. 2. Зависимость потери массы от содержания в образце БНКС после испытаний на горючесть
Fig. 2. Dependence of mass loss of BNCR in the sample after flammability tests on the content

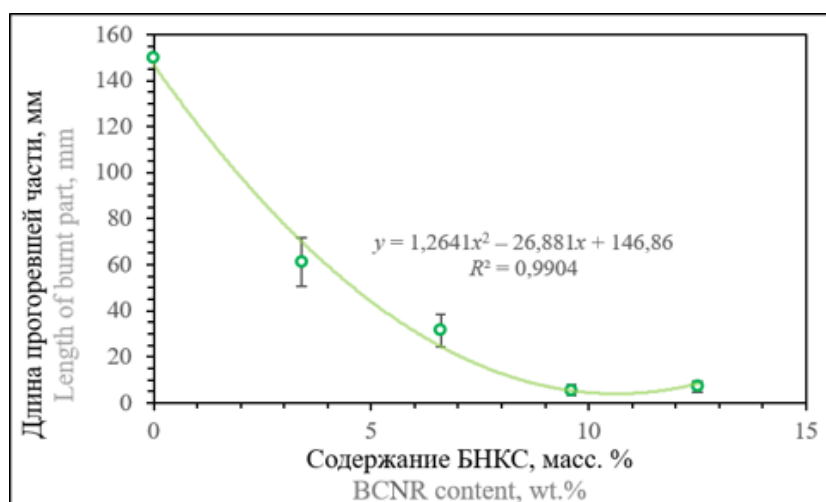


Рис. 3. Зависимость длины прогоревшей части от содержания в образце БНКС после испытаний на горючесть

Fig. 3. Dependence of the length of the burnt part on the content of BCNR in the sample after flammability tests

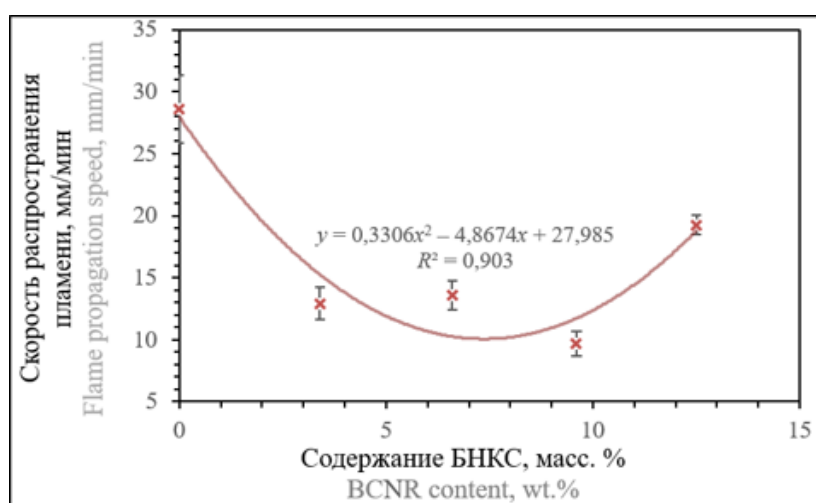


Рис. 4. Зависимость скорости распространения пламени от содержания в образце БНКС

Fig. 4. Dependence of flame propagation rate on the content of BCNR in the sample

Закключение

В ходе работы было исследовано влияние бромированной карданольной новолачной смолы на показатели горючести древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена низкого давления. Было выявлено, что добавление БНКС в количестве от 3,4 до 12,5 мас. % значительно уменьшает пожароопасность материала благодаря комплексному механизму огнезащиты: газофазному ингибированию пламени (выделению активного брома) и увеличению кок-

сообразования в конденсированной фазе (ароматического каркаса смолы).

Наилучшая концентрация модификатора составляет 9,6 мас. %. При этом значении достигается максимальный эффект: потеря массы после огневых испытаний сокращается до 6,8 % (в 9,6 раза меньше, чем у немодифицированного образца), длина прогоревшей зоны уменьшается до 5,5 мм, а скорость распространения пламени снижается до 9,7 мм/мин. Горящие капли и структурное разрушение образцов полностью предотвращаются. Дальнейшее

увеличение содержания БНКС до 12,5 мас. % не приводит к значительному улучшению параметров, а рост скорости распространения пламени до 19,3 мм/мин свидетельствует о достижении предела эффективности и возможном изменении реологических свойств полимерной системы.

Результаты исследования подтверждают высокую перспективность БНКС, биогенного антипирена экологически безопасного происхождения, для модификации ДПК.

Рекомендуемая концентрация добавки в 9,6 мас. % обеспечивает соответствие композитов повышенным требованиям пожарной безопасности при сохранении технологичности переработки. В будущих исследованиях необходимо детально изучить влияние БНКС на комплекс физико-механических и реологических характеристик материалов, а также оценить токсичность продуктов термического разложения модифицированных композитов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов / А. Г. Хантимиров [и др.] // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 26–35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN: CMSMHV.
2. Анисеева К. Г., Сафин Р. Р. Обзор свойств древесно-полимерных композитов на основе биоразлагаемых полимеров // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 160–169. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-160-169. EDN: HSWOAI.
3. Талалаева Г. В., Пазникова С. Н. Современные композиционные материалы: перспективы и риски применения их в области комплексной безопасности и гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20, № 1 (75). С. 107–114. EDN: FABFAX.
4. Повышение огнестойкости полимерных композитов / А. Н. Блазнов [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 267–271. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036. EDN: UCVMUF.
5. Влияние технологических факторов на свойства бакелизированной фанеры с карданолсодержащим бакелитовым лаком / О. Ф. Шишлов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 4. С. 44–47.
6. Synthesis of brominated cardanol derivatives and their efficiency as fire retardants for wood / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 3. P. 238–245. DOI: 10.1134/S1995421214030186.
7. Analysis of the influence of cardanol content on the properties of phenol-cardanol-formaldehyde novolac resins / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 1. P. 61–64. DOI: 10.1134/S1995421214010109.
8. Синтез и свойства клеев для древесных слоистых пластиков на основе спирторастворимых резольных фенолкарданолформальдегидных смол / О. Ф. Шишлов [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 7. С. 9–14.
9. Глухих В. В., Шкуро А. Е., Шишлов О. Ф. Синтез, свойства и применение продуктов полимеризации карданола (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. № 1. С. 5–14. DOI:10.14258/jcprm.1301005. EDN: RYJXJ.

10. Красильникова М. А., Баёв А. А., Шкуро А. Е. Получение огнестойких древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // Деревообрабатывающая промышленность. 2025. № 1. С. 45–52. EDN: XYQJFJ.

11. Изучение термоллиза огнестойких древесно-полимерных композитов / М. А. Красильникова [и др.] // Современные проблемы обеспечения безопасности : сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 24–25 апреля 2025 г. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2025. С. 56–60. EDN: HPZDDR.

REFERENCES

1. Influence of Modification on the Durability of Polyvinyl Chloride Wood-Polymer Composites / A. G. Khantimirov [et al.] // Izvestiya of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2023. No. 3 (65). P. 26–35. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26. EDN: CMSMHV.

2. Anikeeva K. G., Safin R. R. Review of the Properties of Wood-Polymer Composites Based on Biodegradable Polymers // Systems. Methods. Technologies. 2023. No. 4 (60). P. 160–169. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-160-169. EDN: HSWOAI.

3. Talalaeva G. V., Paznikova S. N. Modern Composite Materials: Prospects and Risks of Their Application in the Field of Comprehensive Security and Civil Defense // Technologies of Civil Security. 2023. Vol. 20, No. 1 (75). P. 107–114. EDN: FABFAX.

4. Increasing the fire resistance of polymer composites / A. N. Blaznov [et al.] // Polzunovsky Vestnik. 2025. No. 1. P. 267–271. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.036. EDN: UCBMUF.

5. Influence of technological factors on the properties of bakelized plywood with cardanol-containing bakelite varnish / O. F. Shishlov [et al.] // Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. Vol. 17, No. 4. P. 44–47.

6. Synthesis of brominated cardanol derivatives and their effectiveness as fire retardants for wood / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 3. P. 238–245. DOI: 10.1134/S1995421214030186.

7. Analysis of the influence of cardanol content on the properties of phenol-cardanol-formaldehyde novolac resins / O. F. Shishlov [et al.] // Polymer Science, Series D. 2014. Vol. 7, No. 1. P. 61–64. DOI: 10.1134/S1995421214010109.

8. Synthesis and properties of adhesives for wood laminates based on alcohol-soluble resole phenol-cardanol-formaldehyde resins / O. F. Shishlov [et al.] // Adhesives. Sealants. Technologies. 2014. No. 7. P. 9–14.

9. Glukhikh V. V., Shkuro A. E., Shishlov O. F. Synthesis, Properties, and Application of Cardanol Polymerization Products (Review) // Chemistry of Plant Raw Materials. 2013. No. 1. P. 5–14. EDN: RCYXJ.

10. Krasilnikova M. A., Baev A. A., Shkuro A. E. Obtaining fire-resistant wood-polymer composites based on polyvinyl chloride // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost. 2025. No. 1. P. 45–52. EDN: XYQJFJ.

11. Study of thermolysis of fire-resistant wood-polymer composites / M. A. Krasilnikova [et al.] // Modern Problems of Safety Assurance : Collection of Materials of the XXVII International Scientific

and Practical Conference, Yekaterinburg, April 24–25, 2025. Ekaterinburg : UISFS of EMERCOM of Russian, 2025. P. 56–60. EDN: HPZDDR.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Баёв Александр Александрович, адъюнкт Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 547246; ORCID: 0009-0002-1121-6360; e-mail: pancho.99@inbox.ru

Шкуро Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37); РИНЦ ID: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ORCID: 0000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Пазникова Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 403160; e-mail: paznikova2007@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Baev, adjunct of the UISFS of EMERCOM of Russian (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); RSCI ID: 547246; ORCID: 0009-0002-1121-6360; e-mail: pancho.99@inbox.ru

Alexey E. Shkuro, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Pulp and Paper Industry Technologies and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University (37 Sibirsky Tract, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation); ID RSCI: 652044; Scopus Author ID: 56151722700; ORCID: 0000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Svetlana N. Paznikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry and Gorenje Processes, UISFS of EMERCOM of Russian (22 Mira St., Ekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 403160; e-mail: paznikova2007@mail.ru