

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 699.8:667
МРНТИ 81.92.31

М. М. Альменбаев¹, Б. Ж. Рахметулин¹, А. Б. Сивенков², И. А. Захаров¹

¹*Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина
МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан*

²*ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт
противопожарной обороны» МЧС России, Балашиха, Россия*

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ ОГНЕЗАЩИТЫ

Аннотация. В работе авторами представлены экспериментальные исследования снижения токсичности продуктов горения образцов древесины с нанесением разработанного огнезащитного состава на основе фосфор и азот содержащих антипиренов с добавлением полиакрилата калия (SAP), при влиянии различных температурных режимов. Полученные результаты свидетельствуют, что разработанный авторами огнезащитный состав не только снижает уровень выделения СО и СО₂ при горении древесины, но имеет выраженный эффект при использовании составов с фосфорсодержащими и азотсодержащими антипиренами обугленный защитный слой, препятствующий проникновению кислорода и снижению интенсивности горения.

Ключевые слова: древесина, пожарная опасность, огнезащитный состав, токсичность, продукты горения.

Древесина на протяжении столетий остаётся одним из ключевых материалов, применяемых в строительной отрасли, что обусловлено её возобновляемостью, экологической безопасностью, относительно низкой энергоёмкостью производства, а также благоприятным соотношением прочностных характеристик и массы. В условиях современной концепции устойчивого развития древесина всё чаще рассматривается в качестве полноценной альтернативы традиционным минеральным и полимерным строительным материалам.

Несмотря на указанные преимущества, одной из фундаментальных проблем, существенно ограничивающих масштабное использование древесины в зданиях с повышенными требованиями к пожарной безопасности, является её высокая воспламеняемость, а также значительная токсичность продуктов термического разложения и горения. При сгорании древесины в окружающую среду выделяется широкий спектр химических соединений, в том числе угарный газ, альдегиды, органические кислоты и ряд других токсикантов, оказывающих серьёзное

воздействие на здоровье человека и ухудшающих условия проведения аварийно-спасательных работ.

В целях повышения огнестойкости конструкций и снижения токсикологической опасности продуктов горения применяются различные огнезащитные составы, принцип действия которых заключается как в замедлении процессов пиролиза и воспламенения, так и в модификации химического состава выделяющихся газов. В современных исследованиях особое внимание уделяется комплексной оценке эффективности таких составов, включающей не только снижение скорости распространения пламени и теплоотдачи, но и изучение изменения токсикологического профиля продуктов горения обработанной древесины.

При горении древесины образуются не только тепло и дым, но и широкий спектр опасных химических соединений, включая угарный газ (CO), диоксид углерода (CO₂), формальдегид, акролеин, фенолы, полиароматические углеводороды (ПАУ), а также мелкодисперсные твердые частицы. Эти вещества оказывают острое и хроническое токсическое воздействие на человека, особенно в условиях закрытых помещений при пожаре. Согласно результатам проведённых исследований, свыше 60 % случаев гибели людей при пожарах обусловлены не воздействием высоких температур и термическими ожогами, а отравлением токсичными продуктами горения.

Химический состав продуктов термического разложения зависит от многих факторов: температуры горения, наличия кислорода, породы древесины, влажности, а также наличия защитных покрытий и пропиток. Ранее проведённые исследования показали, что обработка древесины огнезащитными составами может не только снизить воспламеняемость, но и повлиять на токсикологический профиль продуктов горения [1, 2]. Например, антипирены на основе соединений фосфора и азота уменьшают выделение угарного газа и замедляют процесс пиролиза. Однако некоторые антипирены, особенно на основе галогенов, при высоких температурах могут образовывать ещё более опасные соединения, такие как диоксины и фураны [3]. Современные исследования направлены на создание нетоксичных или малотоксичных огнебиозащитных составов, способных эффективно препятствовать горению и одновременной генерации опасных веществ. Особый интерес вызывают биоразлагаемые составы и покрытия на основе наноцеллюлозы, кремнийорганических соединений и фосфолипидов, которые, согласно недавним данным [4], демонстрируют не только хорошую огнестойкость, но и существенно снижают токсичность выделяемых продуктов при термическом разложении.

Таким образом, проблема токсичности при горении древесины остаётся актуальной и требует всестороннего научного подхода.

Целью настоящего исследования является определение эффективности огнезащитных азот содержащих составов с добавлением полиакрилата калия (SAP) в снижении токсичности продуктов горения древесины при различных температурных режимах.

В качестве образцов для исследования использовалась древесина сосны, широко применяемая в строительстве (рисунок 1). Образцы имели размеры 40×40×10 мм и предварительно выдерживались в стандартных условиях (температура 20±2 °С, относительная влажность 50±5 %) в течение двух недель.

На поверхность образцов наносились огнезащитные составы различной химической природы с учетом норм расхода. Для оценки токсичности применялись методики, регламентированные ГОСТ 12.1.044-89*, в частности пункт 4.20 [5]. Испытания проводились в условиях беспламенного (тлеющего) горения, так как данный режим характеризуется наибольшим выходом токсичных продуктов горения [7].



Рисунок 1 - Образец древесины сосны обработанный огнезащитным составом

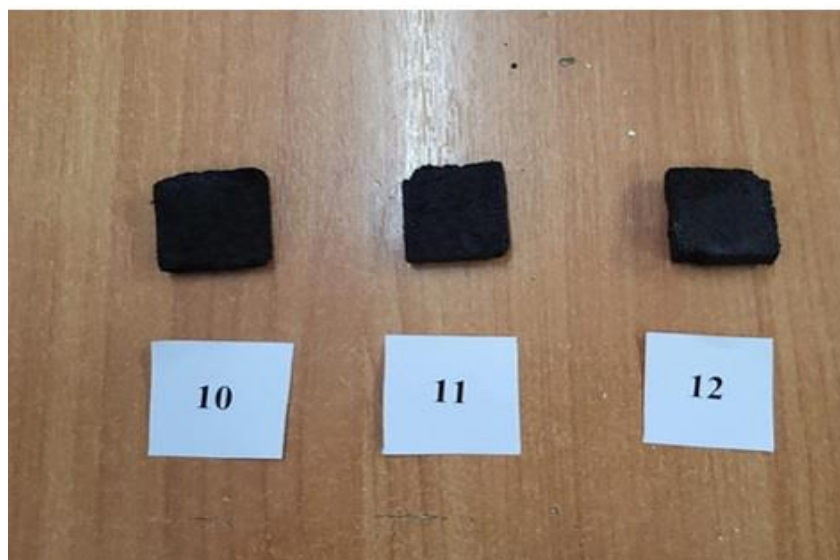


Рисунок 2 - Образцы после огневых испытаний

В ходе экспериментов определялись концентрации монооксида углерода (CO) и диоксида углерода (CO₂), являющихся основными индикаторами токсичности продуктов горения органических материалов [8].

Результаты эксперимента были зарегистрированы с помощью газоанализатора.



Рисунок 3 - Показатели экспериментальных образцов на газоанализаторе

Анализ полученных данных показал, что применение огнезащитных составов приводит к снижению уровней выделения CO и CO₂ при горении древесины. Особенно выраженный эффект наблюдается при использовании составов с фосфорсодержащими и азотсодержащими антипиренами, которые формируют на поверхности древесины обугленный защитный слой, препятствующий проникновению кислорода и снижению интенсивности горения [6, 9].

Таблица 1 – Токсичность продуктов горения

Режим	Серия	CO, мг/л	CO ₂ , мг/л	Класс токсичности
Тление 450 °C	Без обработки	3,2	42	T3
	SAP-обработка	1,9	27	T2
Пламя 700 °C	Без обработки	6,7	58	T3
	SAP-обработка	3,8	34	T2

Антипирены фосфор- и азотного ряда формируют на поверхности вспученный углеродный защитный слой, а SAP обеспечивает эндотермическое охлаждение, что совместно уменьшает образование CO и CO₂ на 30-45 %.

На рисунке 4 представлены зависимости показателя токсичности продуктов горения древесины с огнезащитой на основе полиакрилата калия (SAP) при огневых испытаниях.

Графическая интерпретация зависимости показателя токсичности от температуры выявила экстремальный характер изменения при переходе из режима тления в режим пламенного горения (диапазон температур 550-750 °C). Это связано с изменением механизма термического разложения материала и состава выделяемых продуктов [7, 8].

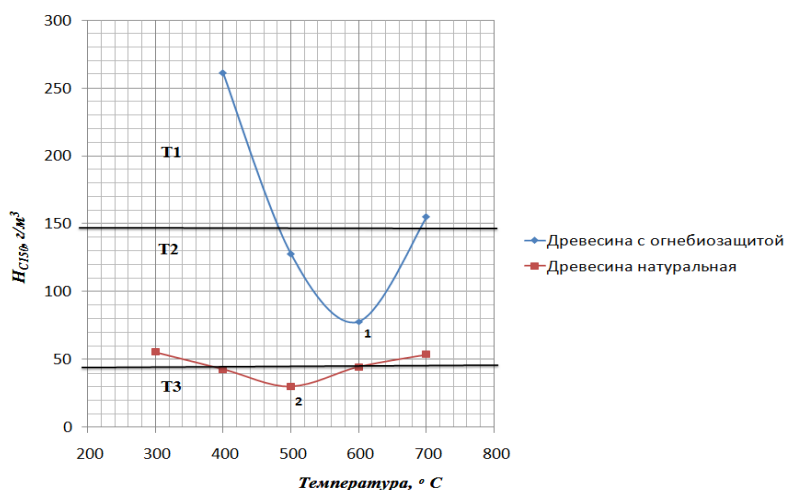


Рисунок 4 – Зависимость показателя токсичности продуктов горения древесины с огнезащитой на основе полиакрилата калия (SAP) при огневых испытаниях

Образцы древесины, обработанные огнезащитными составами, отнесены к категории Т2 (умеренно опасные по токсичности продуктов горения), в то время как необработанная древесина соответствует группе Т3 (высокоопасные по токсичности продуктов горения) [9]. Это подтверждает эффективность применяемых составов в обеспечении пожарной безопасности.

Также установлено, что на итоговые показатели токсичности влияет не только химическая природа состава, но и глубина его проникновения в древесину, а также плотность и равномерность нанесения [10].

Проведенное исследование убедительно продемонстрировало, что применение огнезащитных азотсодержащих составов с добавлением полиакрилата калия (SAP) способствует существенному снижению токсичности газообразных продуктов горения древесины. Установлено, что использование подобных составов не только уменьшает выделение наиболее опасных компонентов дыма, таких как монооксид углерода и диоксид углерода, но и способствует формированию на поверхности древесины термоустойчивого обугленного слоя, препятствующего интенсивному протеканию процессов пиролиза и воспламенения.

Полученные результаты подтверждают перспективность выбранного направления в контексте повышения пожарной безопасности строительных конструкций из древесины, а также указывают на необходимость дальнейшего углублённого изучения влияния различных огнезащитных композиций на комплексный токсикологический профиль выделяющихся при горении газов. В частности, целесообразным представляется расширение исследований за счёт оценки содержания и динамики образования других токсичных соединений – например, альдегидов, фенолов и полиароматических углеводородов, а также анализа влияния режимов горения и условий эксплуатации на эффективность огнезащитных покрытий [11, 12].

Кроме того, результаты работы имеют значимую практическую ценность для разработки и совершенствования технологий производства экологически безопасных и эффективных огнебиозащитных составов, что, в конечном итоге, может

способствовать снижению уровня пожарного риска и повышению безопасности зданий и сооружений, выполненных с применением древесины. Таким образом, полученные данные представляют как теоретический интерес для дальнейших научных исследований, так и важное прикладное значение для сферы пожарной профилактики и материаловедения.

Данные исследования выполнены в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту AP23488530 на тему: «Инновационные подходы в области обеспечения пожарной безопасности древесных конструкционных материалов».

Список литературы

1. Liang Y. et al. Research and application of biomass-based wood flame retardants: a review. *Polymers*, 2023, T. 15, № 4, p. 950.
2. Дягилева А. Б., Смирнова А. И. Новые композиционные материалы для целевой экологически безопасной модификации древесины // Актуальная биотехнология. – 2020. – № 3. – С. 429-431.
3. Van der Veen I., de Boer J. Phosphorus flame retardants: properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, 2012, T. 88, № 10, pp. 1119-1153.
4. Chen Y. et al. Recent progress on nanocellulose aerogels: preparation, modification, composite fabrication, applications. *Advanced Materials*, 2021, T. 33, № 11, С. 34.
5. ГОСТ 12.1.044-89*. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
6. Альменбаев М.М., Карменов К.К., Ельчугин А.В., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Влияние огнезащитных составов на горючесть древесины // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 10. – С. 54-55.
7. Баранов П.А., Власов С.Ю. Токсичность продуктов горения строительных материалов // Безопасность в техносфере. – 2017. – № 2(42). – С. 31–36.
8. Sivenkov A.B., Berlin A.A., Mukhamedgaliev B.A., Almenbayev M.M., Makishev Zh.K., Rakhmetulin B.Zh. Monograph (2023), Fire Hazard and Fire Resistance of Wooden Structures, *Springer Nature*, 269 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24074-4>
9. Шеин А.И., Герасимова Н.М. Оценка токсичности газов, выделяющихся при тлении древесины // Пожарная безопасность. – 2018. – № 3. – С. 18–22.
10. Кленов Г.С., Журавлев В.А. Пожарная опасность строительных материалов. – М.: Стройиздат, 2010. – 224 с.
11. Almenbaev M.M., Kussainov A.B., Maksimov P.V., Sivenkov A.B. Study on the flammability of wood-based building materials // Наука и образование в гражданской защите. – 2025. – № 1 (57). – С.16-20.
12. Альменбаев М.М., Сивенков А.Б., Кусаинов А.Б., Захаров И.А. Способ снижения дымообразующей способности древесины с огнезащитным составом на основе полиакрилата калия (SAP) // Наука и образование в гражданской защите. – 2025. – № 3 (59). – С.59-63.

References

1. Liang Y. et al. Research and application of biomass-based wood flame retardants: a review, *Polymers*, 2023, T. 15, № 4, S. 950.

2. Djagileva A.B., Smirnova A.I. Novye kompozicionnye materialy dlja celevoj jekologicheski bezopasnoj modifikacii drevesiny // Aktual'naja biotehnologija. – 2020. – № 3. – S. 429-431.
3. Van der Veen I., de Boer J. Phosphorus flame retardants: properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis. *Chemosphere*, 2012, T. 88, № 10, pp. 1119-1153.
4. Chen Y. et al. Recent progress on nanocellulose aerogels: preparation, modification, composite fabrication, applications. *Advanced Materials*, 2021, T. 33, № 11, p. 34.
5. GOST 12.1.044-89*. Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharovzryvoopasnost' veshhestv i materialov. Nomenklatura pokazatelej i metody ih opredelenija.
6. Al'menbaev M.M., Karmenov K.K., El'chugin A.V., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Vlijanie ogneshhitnyh sostavov na gorjuchest' drevesiny // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 10. – S. 54-55.
7. Baranov P.A., Vlasov S.Ju. Toksichnost' produktov gorenija stroitel'nyh materialov // Bezopasnost' v tehnosfere. – 2017. – № 2(42). – S. 31–36.
8. Sivenkov A.B., Berlin A.A., Mukhamedgaliev B.A., Almenbayev M.M., Makishev Zh.K., Rakhmetulin B. Zh. Monograph (2023), *Fire Hazard and Fire Resistance of Wooden Structures*, Springer Nature, 269 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24074-4>
9. Shein A.I., Gerasimova N.M. Ocenka toksichnosti gazov, vydelyajushhihsja pri tlenii drevesiny // Pozharnaja bezopasnost'. – 2018. – № 3. – S. 18–22.
10. Klénov G.S., Zhuravlëv V.A. Pozharnaja opasnost' stroitel'nyh materialov. – M.: Strojizdat, 2010. – 224 s.
11. Almenbaev M.M., Kussainov A.V., Maksimov R.V., Sivenkov A.V. Study on the flammability of wood-based building materials // Nauka i obrazovanie v grazhdanskoj zashhite. – 2025. – № 1 (57). – S.16-20.
12. Al'menbaev M.M., Sivenkov A.B., Kusainov A.B., Zaharov I.A. Sposob snizhenija dymobrazujushhej sposobnosti drevesiny s ogneshhitnym sostavom na osnove poliakrilata kalija (SAP) // Nauka i obrazovanie v grazhdanskoj zashhite. – 2025. – № 3 (59). – S.59-63.

М. М. Әлменбаев¹, Б. Ж. Рахметулин¹, А. Б. Сивенков², И. А. Захаров¹

¹Қазақстан Республикасы ТЖМ М. Ғабдуллин атындағы Азаматтық қорғау академиясы, Көкшетау, Қазақстан

²«Бүкілресейлік «Құрмет Белгісі» ордені өртке қарсы қорғаныс ғылыми-зерттеу институты» ФМБМ, Балашиха, Ресей

ӨРТТЕН ҚОРҒАУ АРҚЫЛЫ АҒАШТЫҢ ЖАНУ ӨНІМДЕРІНІҢ УЫТТЫЛЫҒЫН ТӨМЕНДЕТУ

Аңдатпа. Авторлармен бұл жұмыста фосфор және полиакрилат калий (SAP) қосылған азот антиперендері бар негізінде әзірленген оттан қорғау құрамын жағумен түрлі температуралық режимдері ықпалы кезінде ағаша үлгілерінің жану өнімдерінің уыттылығын төмендету бойынша эксперименттік зерттеулер ұсынылған. Алынған нәтижелер бойынша авторлармен әзірлеген оттан қорғау құрам ағаштың жану кезіндегі СО және СО₂ бөліну деңгейін төмендетіп ғана қоймай, фосфорқосындысы және азотқосындылары бар антиперендерімен құрам күйген қорғау қабатқа айқын әсер етеді, оттектің енуін және жану қарқындылығын азайтады.

Түйінді сөздер: ағаш, өрт қауіпі, оттан қорғау, улылығы, жану өнімдері.

M. M. Almenbaev¹, B. Zh. Rakhmetulin¹, A. B. Sivenkov², I. A. Zakharov¹

¹*Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan*

²*All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russia*

REDUCTION OF TOXICITY OF WOOD COMBUSTION PRODUCTS USING FIRE PROTECTION

Abstract. The authors present experimental studies of reducing the toxicity of combustion products of wood samples by applying a developed flame retardant based on phosphorus and nitrogen-containing flame retardants with the addition of potassium polyacrylate (SAP), under the influence of various temperature conditions. The results obtained indicate that the flame retardant developed by the authors not only reduces the level of CO and CO₂ emissions during wood combustion, but also has a pronounced effect when using formulations with phosphorus-containing and nitrogen-containing flame retardants, a charred protective layer that prevents oxygen penetration and reduces the intensity of combustion.

Keywords: wood, fire hazard, flame retardant, toxicity, combustion products.

Information about the authors / Авторлар туралы мәлімет

Альменбаев Миржан Маратович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент), заместитель начальника Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан по научной работе, Кокшетау, Казахстан. E-mail: make_kz1986@mail.ru

Рахметулин Берик Жамбулович – ассоциированный профессор (доцент), начальник кафедры пожарной профилактики Академии гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан. E-mail: b.rahmetulin@mail.ru

Сивенков Андрей Борисович – доктор технических наук, профессор, ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны», Московская область, Балашиха, Российская Федерация

Захаров Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент), начальник научно-исследовательского центра Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан. E-mail: emercom.87@mail.ru

Mirzhan M. Almenbayev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (docent), Deputy Head of the Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan for scientific work, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: make_kz1986@mail.ru

Berik Zh. Rakhmetulin – Associate Professor (docent), Head of the Department of Fire Prevention of the M. Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: b.rahmetulin@mail.ru

Andrey B. Sivenkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, All-Russian Order of the Badge of Honor Research Institute of Fire Defense, Moscow region, Balashikha, Russian Federation

Igor A. Zakharov – Candidate of Technical Sciences, associate professor (docent), head of the research center of the Malik Gabdullin Academy of Civil Protection of the MES of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan. E-mail: emercom.87@mail.ru