

Научная статья

УДК 661.174

doi: 10.34987/2712-9233.2025.13.70.003

Экологическая безопасность антипиренов

Эльвира Камрановна Курбанова

Академии МЧС Азербайджанской Республики

Автор ответственный за переписку: Эльвира Камрановна Курбанова elvira.gurbanova@fhn.gov.az

Аннотация. Антипирены — это материалы или химикаты, которые повышают пожарную безопасность. Их основное назначение заключается в замедлении процесса горения, снижении скорости распространения пламени. В статье приведены результаты анализа научной литературы по изучению влияния антипиренов на окружающую среду и здоровье человека. Автор произвел сравнение различных классов антипиренов, механизмы их действия и влияния на человеческий организм. Рассмотрены механизмы действий и неблагоприятные последствия некоторых антипиренов. Стоит отметить необходимость дальнейшего изучения антипиренов и проведения работ направленных на поиски альтернативных составов с целью смягчения воздействия антипиренов на окружающую среду и здоровье человека.

Ключевые слова: антипирены, экология, здоровье, безопасность, человек

Для цитирования: Курбанова Э.К. Экологическая безопасность антипиренов // Актуальные проблемы безопасности в техносфере 2025. № 2 (18). С.16-20. URL:<https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.13.70.003>

Environmental safety of fire retardants

Elvira K. Gurbanova

Academy MES of Azerbaijan Republic

Corresponding author: Elvira K. Gurbanova, elvira.gurbanova@fhn.gov.az

Abstract. Fire retardants are materials or chemicals that improve fire safety. Their main purpose is to slow down the combustion process, reduce the rate of flame propagation. The article presents the results of the analysis of scientific literature on the impact of fire retardants on the environment and human health. The author compared different classes of fire retardants, their mechanisms of action and impact on the human body. The mechanisms of action and adverse effects of some fire retardants are considered. It is worth noting the need for further study of fire retardants and work aimed at finding alternative compositions in order to mitigate the impact of fire retardants on the environment and human health.

Key words: fire retardants, ecology, health, safety, human

For citation: Gurbanova E.K. Environmental safety of fire retardants // Actual problems of safety In the technosphere 2025. No. 2 (18). P. 16-20. URL:<https://doi.org/10.34987/2712-9233.2025.13.70.003>

Антипирены — это материалы или химикаты, которые повышают пожарную безопасность, снижая воспламеняемость материалов и замедляя распространение огня. Они обеспечивают данную характеристику посредством различных механизмов, включая формирование защитных барьеров, высвобождение негорючих газов и содействием образованию угля.

Антипирены могут создавать защитный слой угля на поверхности материала, который действует как барьер для тепла и кислорода, замедляя горение. Например, оксид графена с органофосфатными функциональными группами повышает пожарную безопасность, образуя высококачественный вспучивающийся уголь, который обеспечивает превосходную изоляцию и барьерные эффекты. Некоторые антипирены выделяют инертные газы, которые разбавляют горючие газы и уменьшают доступность кислорода, тем самым замедляя процесс горения. Это видно на примере использования поли (фенилфосфорил фенилендиамин) в биоразлагаемой полимолочной кислоте, которая сочетает ингибирование фосфорсодержащих радикалов с высвобождением инертного газа. Как отмечалось выше, вспучивающиеся антипирены способствуют образованию слоя угля, который изолирует лежащий под ними материал от тепла. Это очевидно при использовании электростатически функционализированных углеродных нанотрубок в поли (бутиленсукцинате), что повышает стабильность угля и снижает выделение тепла.

В полимерах антипирены работают через различные механизмы, чтобы снизить воспламеняемость и повысить огнестойкость. Эти механизмы можно в целом разделить на конденсированные и газофазные действия, а также синергетические эффекты при использовании нескольких агентов.

Механизм антипиренов основанный на конденсированном действии упомянут выше. При радикальном гашении, например, при использовании некоторых антипиренов, таких как фосфорсодержащие соединения, выделяются радикалы, которые мешают процессу горения в газовой фазе, препятствуя распространению пламени. Так же, возможно осуществить метод основанный на поглощении и разбавлении тепла. Например, некоторые добавки поглощают тепло и выделяют негорючие газы, которые разбавляют концентрацию горючих газов, снижая общую скорость выделения тепла.

Синергетический эффект проявляется за счет сочетания добавок. Использование нескольких антипиренов, таких как полифосфат аммония со слоистыми двойными гидроксидами, может повысить огнестойкость за счет синергетического эффекта, улучшая как образование угля, так и ингибирование газовой фазы.

Повысить пожарную безопасность материала можно путём электростатического и межфазного взаимодействия. Накопление наночастиц на границе раздела между полимером и антипиреном может повысить эффективность антипирена и улучшить механические свойства.

Несмотря на то, что антипирены предотвращают или замедляют распространение огня в различных материалах, их использование создает ряд проблем, включая загрязнение окружающей среды, риски для здоровья и нормативные проблемы.

Многие антипирены, особенно органогалогены, связаны со значительными рисками для здоровья, такими как иммунотоксичность и репродуктивная токсичность. Несмотря на запреты на некоторые из этих химикатов, их заменители часто имеют неизвестную токсичность, а продукты, обработанные запрещенными антипиренами, продолжают выделять вредные вещества в окружающую среду (1). ЕРА и другие регулирующие органы работают над оценкой этих рисков и внедрением необходимых стандартов безопасности.

Так, бромированные антипирены широко использовались, но теперь вызывают беспокойство из-за их стойкости в окружающей среде и потенциальных рисков для здоровья. Они были обнаружены в организме человека и окружающей среде, что вызывает тревогу по поводу их долгосрочных эффектов.

Органофосфатные антипирены в качестве альтернативы бромированным антипиренам используются все чаще, но также представляют опасность из-за своей стойкости и потенциального воздействия на окружающую среду. Они встречаются в воде и почве, что указывает на их широкое присутствие в окружающей среде. Некоторые антипирены связаны с неблагоприятными последствиями для здоровья, а их присутствие в окружающей среде вызывает опасения относительно воздействия на организм человека.

Бромированные антипирены, включая полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ) и гексабромциклододекан (ГБЦД) встречаются в различных средах окружающей среды, таких как воздух,

вода и почва. Они устойчивы в окружающей среде и могут накапливаться в пищевой цепи, что приводит к потенциально неблагоприятному воздействию на дикую природу и людей [2, 8, 3]. Новые бромированные антипирены (NBFR) были разработаны в качестве замены устаревшим BFR, но они также демонстрируют высокие биоаккумулятивные свойства и устойчивость к деградации, что может создавать потенциальные экологические риски [3].

Воздействие BFR на человека происходит различными путями, включая продукты питания, воздух и воду. Младенцы и дети ясельного возраста особенно уязвимы из-за более высоких концентраций, которые могут содержаться в грудном молоке [8]. BFR были обнаружены в исследованиях по биомониторингу человека с различными уровнями воздействия в разных регионах.

Антипирены, такие как гексабромциклододекан (ГБЦД) и тетрабромбисфенол А (ТББФА), могут действовать как эндокринные разрушители, нарушая гормональные функции и потенциально приводя к расстройствам щитовидной железы [4,5,6]. Несколько исследований показали связь между воздействием антипиренов и изменениями гормонов щитовидной железы, включая изменения уровней тиреотропного гормона (ТТГ), свободного тироксина (СТ4) и свободного трийодтиронина (СТ3) [6,7,8]. Нарушения в нейropsychологическом развитии и поведенческие расстройства так же могут быть спровоцированы воздействием антипиренов. Есть данные, свидетельствующие о том, что воздействие антипиренов может влиять способствовать к отклонениям в развитии и поведенческим проблемам, особенно у детей [5,9,10]. Кроме того, антипирены связаны с проблемами репродуктивного здоровья и задержкой развития, а некоторые исследования указывают на потенциальное влияние на фертильность и патологии при беременности [4,11]. Рак и другие заболевания могут быть последствием использования некоторых антипиренов. Имеются научные публикации в которых отмечено, что воздействие этих химических веществ может быть связано с повышенным риском развития рака и других заболеваний, хотя для подтверждения этих связей необходимы дополнительные исследования [9,11]. Более того, антипирены могут представлять риск иммунотоксичности, гепатотоксичности и неблагоприятным воздействием на органы дыхания [11].

На данный момент ведутся научные работы направленные на минимизацию негативного воздействия антипиренов как на окружающую среду, так и на здоровье человека. Последние разработки в области огнестойких покрытий направлены на улучшение огнестойкости при снижении токсичности. Они включают использование современных полимерных материалов и активных биологических веществ. Но все равно полностью данные задачи не решены и требуют дальнейшей работы.

Достижения в области огнестойких материалов на биологической основе направлены на разработку устойчивых, нетоксичных альтернатив традиционным огнестойким материалам. Были предприняты попытки улучшить огнестойкость полиуретанов при введении в их состав специальных масел и реактивных и аддитивных огнестойких растворов [12].

Так же, были разработаны антипирены на биологической основе для термореактивных смол. В данных антипиренах основное внимание уделяется соединениям, которые образуют защитный коксовый слой во время горения. Однако для достижения значительной огнестойкости часто требуются высокие концентрации добавок, что может повлиять на физико-химические свойства веществ [13].

Био-антипирены для текстиля используют такие соединения, как сывороточные белки и казеины, которые эффективны и оказывают малое воздействие. Обработки тканей можно применять с использованием существующих методов текстильной промышленности без опасных химикатов [14].

Еще одно вещество, которое используют как добавку к био-антипиренам – это лигнин. Лигнин с его ароматической структурой является перспективным антипиреном на биологической основе. Модифицированный лигнин, часто в сочетании с фосфором и азотом, демонстрирует хорошие показатели в различных полимерных матрицах, улучшая антипиреновые и механические свойства [15].

Соединения на основе танина, полифенольного соединения, демонстрируют значительный потенциал огнестойкости. Его эффективность обусловлена его способностью образовывать защитный слой угля [16].

Огнестойкие биокomпозиты, которые частично или полностью биоразлагаемы, эти материалы разработаны для соответствия стандартам пожарной безопасности при сохранении экологических преимуществ [17].

Несмотря на заметные улучшения в данной области, существует необходимость в более детальных оценках безопасности антипиренов, поскольку рассматривать их как единый класс нецелесообразно.

Национальные академии наук, инженерии и медицины предложили оценку подклассов для более точной оценки опасности. Для эффективного управления рисками, связанными с антипиренами, рекомендуются более строгие правила и альтернативные оценки.

Таким образом, антипирены являются важным инструментом в борьбе с пожарами и обеспечивают дополнительную для сохранности имущества. Они представляют собой специальные вещества или добавки, используемые для повышения огнестойкости материалов — древесины, пластика, тканей, бумаги и других горючих материалов. Однако антипирены могут выделять токсичные вещества, которые создают проблемы для окружающей среды и здоровья человека. Стоит отметить необходимость дальнейшего изучения антипиренов и проведения работ направленных на поиски альтернативных составов с целью смягчения воздействия антипиренов на окружающую среду и здоровье человека.

Список использованных источников

1. Shaw, S. (2010). Halogenated Flame Retardants: Do the Fire Safety Benefits Justify the Risks?. *Reviews on Environmental Health*, 25, 261 - 306. <https://doi.org/10.1515/REVEH.2010.25.4.261>
2. Cristale, J., Katsoyiannis, A., Sweetman, A., Jones, K., & Lacorte, S. (2013). Occurrence and risk assessment of organophosphorus and brominated flame retardants in the River Aire (UK).. *Environmental pollution*, 179, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.001>
3. Xiong, P., Yan, X., Zhu, Q., Qu, G., Shi, J., Liao, C., & Jiang, G. (2019). A review of environmental occurrence, fate, and toxicity of novel brominated flame retardants.. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03159>
4. Feiteiro, J., Mariana, M., & Cairrão, E. (2021). Health toxicity effects of brominated flame retardants: From environmental to human exposure.. *Environmental pollution*, 285, 117475. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117475>
5. Dishaw, L., Macaulay, L., Roberts, S., & Stapleton, H. (2014). Exposures, mechanisms, and impacts of endocrine-active flame retardants.. *Current opinion in pharmacology*, 19, 125-33. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2014.09.018>
6. Yeshoua, B., Castillo, R., Monaghan, M., & Van Gerwen, M. (2024). A Review of the Association between Exposure to Flame Retardants and Thyroid Function. *Biomedicines*, 12. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12061365>
7. Wang, S., Romanak, K., Hendryx, M., Salamova, A., & Venier, M. (2019). Association between Thyroid Function and Exposures to Brominated and Organophosphate Flame Retardants in Rural Central Appalachia.. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04892>
8. Fromme, H., Becher, G., Becher, G., Hilger, B., & Völkel, W. (2016). Brominated flame retardants - Exposure and risk assessment for the general population.. *International journal of hygiene and environmental health*, 219 1, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.08.004>
9. Kim, Y., Harden, F., Toms, L., & Norman, R. (2014). Health consequences of exposure to brominated flame retardants: a systematic review.. *Chemosphere*, 106, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.064>
10. Castorina, R., Bradman, A., Stapleton, H., Butt, C., Avery, D., Harley, K., Gunier, R., Holland, N., & Eskenazi, B. (2017). Current-use flame retardants: Maternal exposure and neurodevelopment in children of the CHAMACOS cohort.. *Chemosphere*, 189, 574-580. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.037>
11. Jin, Y., & Chen, S. (2019). Flame Retardants: Exposure, Biomarkers, and Health Risks. *Emerging Chemicals and Human Health*. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9535-3_8
12. Vahabi, H., Rastin, H., Movahedifar, E., Antoun, K., Brosse, N., & Saeb, M. (2020). Flame Retardancy of Bio-Based Polyurethanes: Opportunities and Challenges. *Polymers*, 12. <https://doi.org/10.3390/polym12061234>
13. Dowbysz, A., Samsonowicz, M., & Kukfisz, B. (2022). Recent Advances in Bio-Based Additive Flame Retardants for Thermosetting Resins. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084828>
14. Malucelli, G. (2024). Bio-Sourced Flame Retardants for Textiles: Where We Are and Where We Are Going. *Molecules*, 29. <https://doi.org/10.3390/molecules29133067>

15. Yang, H., Yu, B., Xu, X., Bourbigot, S., Wang, H., & Song, P. (2020). Lignin-derived bio-based flame retardants toward high-performance sustainable polymeric materials. *Green Chemistry*, 22, 2129-2161. <https://doi.org/10.1039/d0gc00449a>
16. Basak, S., Raja, A., Saxena, S., & Patil, P. (2021). Tannin based polyphenolic bio-macromolecules: Creating a new era towards sustainable flame retardancy of polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 189, 109603. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2021.109603>
17. Anannya, F., & Mahmud, M. (2019). Developments in Flame-Retardant Bio-composite Material Production. *Advances in Civil Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1520/ACEM20180025>

Статья поступила в редакцию 26.03.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 20.06.2025.

The article was submitted 26.03.2025, approved after reviewing 27.05.2025, accepted for publication 20.06.2025.