

УДК 678.046:628.477

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ АНТИПИРЕНЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ, МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Якубова Татьяна Валерьевна¹, Шкуро Алексей Евгеньевич², Плюснин Григорий Александрович¹, Хатыпов Денис Акрамович¹

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

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

Аннотация. Обзор посвящен актуальной проблеме разработки и применения биоразлагаемых антипиренов как экологичной альтернативы традиционным огнезащитным составам. Рассмотрены основные классы таких антипиренов, включая биополимеры (лигнин, хитозан, ДНК, фитиновая кислота), модифицированные природные соединения и синтетические биоразлагаемые системы. Подробно описаны механизмы их огнезащитного действия в конденсированной и газовой фазах, а также важность синергетических эффектов при комбинировании различных компонентов. Особое внимание уделено методам оценки биоразлагаемости и экотоксичности, соответствующим международным стандартам (OECD, ISO), и сложностям, связанным с влиянием полимерной матрицы и условий окружающей среды. Проанализированы ключевые преимущества биоразлагаемых антипиренов, такие как снижение долговременного экологического риска и соответствие принципам «зеленой» химии, а также их недостатки, включая сравнительно более низкую эффективность, проблемы совместимости с полимерами и высокую стоимость. Описаны перспективные области применения в строительстве, текстильной промышленности, электронике, транспорте и упаковке. Отмечены современные тренды развития, такие как интеллектуальный дизайн молекул, использование нанотехнологий и биоинженерии. Подчеркнута необходимость междисциплинарного подхода для успешной разработки и внедрения данных материалов, отвечающих требованиям пожарной безопасности и устойчивого развития.

Ключевые слова: биоразлагаемые антипирены, экологичная огнезащита, «зеленые» антипирены, пожарная безопасность полимеров, возобновляемое сырье, механизмы огнезащиты, синергизм антипиренов, экотоксичность

Для цитирования: Биоразлагаемые антипирены: классификация, механизмы действия и оценка экологической безопасности / Т. В. Якубова [и др.] // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 10–26.

BIODEGRADABLE FLAME RETARDANTS: CLASSIFICATION, MECHANISMS OF ACTION AND ENVIRONMENTAL SAFETY ASSESSMENT

Tatiana V. Yakubova¹, Alexey E. Shkuro², Grigory A. Plyusnin¹, Denis A. Khatypov¹

¹ Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This review focuses on the pressing issue of developing and using biodegradable flame retardants as an environmentally friendly alternative to traditional flame retardants. The main classes of such flame retardants are considered, including biobased polymers (lignin, chitosan, DNA, phytic acid), modified natural compounds, and synthetic biodegradable systems. The mechanisms of their flameretardant action in the condensed and gas phases are described in detail, as well as the importance of synergistic effects when combining various components. Particular attention is paid to methods for assessing biodegradability and ecotoxicity in accordance with international standards (OECD, ISO), and the complexities associated with the influence of the polymer matrix and environmental conditions. The key advantages of biodegradable flame retardants, such as reduced longterm environmental risk and compliance with green chemistry principles, are analyzed, as well as their disadvantages, including comparatively lower efficiency, compatibility issues with polymers, and high cost. Promising applications in construction, textiles, electronics, transportation, and packaging are described. Current development trends, such as intelligent molecular design, nanotechnology, and bioengineering, are highlighted. The need for an interdisciplinary approach is emphasized for the successful development and implementation of these materials, which meet fire safety and sustainable development requirements.

Keywords: biodegradable flame retardants, environmentally friendly fire protection, green flame retardants, fire safety of polymers, renewable raw materials, fire protection mechanisms, flame retardant synergy, ecotoxicity

For citation: Biodegradable flame retardants: classification, mechanisms of action and environmental safety assessment / T. V. Yakubova et al. // Technospheric safety. 2026. No. 1 (50). Pp. 10–26.

Введение

Современная жизнь немыслима без полимерных материалов, которые находят применение в строительстве, электронике, транспорте и упаковке. Однако их повсеместное использование сопряжено с серьезной опасностью — большинство полимеров являются горючими, что создает постоянную угрозу возникновения пожаров [1]. Для повышения пожарной безопасности в материалы вводят антипирены — добавки, подавляющие горение. Традиционные антипирены, такие как галогенированные и некоторые виды

фосфорорганических соединений, доказали свою высокую эффективность. Однако за нее пришлось заплатить высокую экологическую цену: эти вещества обладают высокой стойкостью в окружающей среде, склонны к биоаккумуляции и проявляют потенциальную токсичность для человека и экосистем, включая эндокринные нарушения и канцерогенность [2–5].

В связи с вышеизложенным, ключевой задачей современного материаловедения и химии становится разработка новых поколений антипиренов, сочетающих в себе высокую противопожарную эффективность с пониженной экотоксичностью и способностью

к биоразложению в окружающей среде после окончания срока службы изделия.

Целью данного обзора является систематизация и анализ современных научных разработок в области биоразлагаемых антипиренов. В работе рассматриваются их основные классы и химические принципы конструирования, подробно разбираются механизмы огнезащитного действия, оцениваются методы тестирования биоразлагаемости и экотоксичности. Также в статье обобщены преимущества и недостатки этих материалов, перспективные области их применения и обозначены ключевые тенденции и прогнозы дальнейшего развития данной динамично развивающейся области знаний.

Классификация и типы биоразлагаемых антипиренов

Разработка биоразлагаемых антипиренов ведется по нескольким ключевым направлениям, которые систематизируются в зависимости от их происхождения и химической структуры. Основная классификация подразумевает деление на три крупных класса: антипирены, полученные из возобновляемого сырья, минеральные антипирены с низкой токсичностью и синтетические антипирены, спроектированные для биоразложения [6, 7].

Принципы создания биоразлагаемых антипиренов базируются на нескольких фундаментальных подходах. Первый подход заключается во введении в молекулу антипирена легко гидролизуемых или биоразлагаемых химических связей, неустойчивых к воздействию воды, микроорганизмов или ферментов. Наиболее распространенными являются сложноэфирные, амидные и пептидные связи, которые легко разры-

ваются в природных условиях. Второй принцип предполагает использование природного, возобновляемого сырья в качестве исходных веществ, что снижает зависимость от ископаемых ресурсов. Третий важный аспект — минимизация содержания токсичных элементов, таких как галогены и тяжелые металлы. Кроме того, идеальный антипирен должен распадаться на простые нетоксичные соединения, которые легко ассимилируются в окружающей среде [7, 8].

Среди основных классов биоразлагаемых антипиренов выделяют биополимеры с собственной огнестойкостью. К ним относятся лигнин и его производные, способные при нагревании образовывать прочный пористый углеродный слой. Хитозан и хитин действуют по комбинированному механизму, способствуя образованию угля и выделению негорючих газов. ДНК представляет собой интеллектуальную систему огнезащиты, где фосфатные группы способствуют обугливанию, а азотистые основания выделяют аммиак, ингибирующий пламя. Фитиновые кислоты и фитаты, богатые фосфором, катализируют дегидратацию полимерной матрицы, а танины легко карбонизируются с образованием стабильного углеродного барьера. Крахмал и его производные часто используются как углеродный источник в синергистических системах, а белки способствуют вспучиванию и образованию угля. Классификация биоразлагаемых антипиренов и их основные представители обобщены в табл. 1 [7–11].

Особую группу составляют антипирены на основе модифицированных природных соединений — это соединения, полученные путем химической модификации природных молекул для усиления их огнезащитных свойств [7, 8]. Фосфорсодержащие

антипирены включают производные фосфорной кислоты, синтезированные из биомассы, такие как фосфорилированные полисахариды и липиды. Азотсодержащие антипирены представлены производными аминокислот, гуанидином и его солями.

Минеральные антипирены с низкой токсичностью занимают особое положение. Хотя сами неорганические соединения не являются биоразлагаемыми в классическом понимании, они считаются экологически приемлемыми благодаря низкой токсичности и часто используются в биоразлагаемых полимерных матрицах. Гидроксиды металлов, такие как гидроксид алюминия и гидроксид магния, действуют по эндотермическому механизму, поглощая тепло и выделяя пары воды. Фосфаты аммония и меламина действуют в газовой фазе, выделяя ингибирующие горение газы и способствуя образованию защитного слоя.

Кремнийорганические соединения, включая силиконы и силаны, могут быть спроектированы с улучшенной биоразлагаемостью и образуют стабильный силикатный барьер при нагревании.

Синтетические биоразлагаемые антипирены представляют собой соединения, целенаправленно синтезированные для обеспечения биоразложения. К ним относятся биоразлагаемые полифосфаты на основе молочной кислоты, которые сочетают механизм действия фосфора со способностью к гидролитическому разложению. В состав сложных эфиров фосфорных кислот входят легко гидролизуемые связи, обеспечивающие их распад на нетоксичные компоненты. Синтетические полимеры со встроенными сегментами содержат как биоразлагаемые звенья, так и огнезащитные функциональные группы, что позволяет создавать эффективные и экологически безопасные системы [11].

Таблица 1
Классификация биоразлагаемых антипиренов,
их примеры и механизмы действия

Table 1
Classification of biodegradable flame retardants,
their examples and mechanisms of action

Класс Class	Примеры Examples	Механизм действия Mechanism of Action
Биополимеры с собственной огнестойкостью Biopolymers with inherent fire resistance	Лигнин и его производные; хитозан, хитин; ДНК; фитиновая кислота и фитаты; танины; крахмал; белки; наноцеллюлоза Lignin and its derivatives; chitosan, chitin; DNA; phytic acid and phytates; tannins; starch; proteins; nanocellulose	Образование углеродного барьера; выделение негорючих газов (H_2O , NH_3 , CO_2); катализ дегидратации; усиление углеобразования за счет наноструктур Formation of a carbon barrier; release of non-combustible gases (H_2O , NH_3 , CO_2); catalysis of dehydration; enhancement of carbon formation due to nanostructures
Модифицированные природные соединения Modified natural compounds	Фосфорилированные полисахариды; липиды; производные аминокислот; гуанидин и его соли; фосфорилированная наноцеллюлоза Phosphorylated polysaccharides; lipids; amino acid derivatives; guanidine and its salts; phosphorylated nanocellulose	Усиление углеобразования и газовой фазы ингибирования; введение фосфор- и азотсодержащих групп; повышение термостабильности Enhancement of carbon formation and gas-phase inhibition; introduction of phosphorus- and nitrogen-containing groups; increase in thermal stability

Окончание таблицы 1

Класс Class	Примеры Examples	Механизм действия Mechanism of Action
Минеральные антипирены с низкой токсичностью Low toxicity mineral fire retardants	Гидроксид алюминия; гидроксид магния; фосфаты аммония и меламина; силиконы и силаны; глины, слоистые силикаты, цеолиты Aluminum hydroxide; magnesium hydroxide; ammonium and melamine phosphates; silicones and silanes; clays, layered silicates, zeolites	Эндотермическое поглощение тепла; выделение воды и негорючих газов; образование силикатного/фосфатного барьера; синергизм с биополимерами Endothermic heat absorption; release of water and non-flammable gases; formation of silicate/phosphate barrier; synergism with biopolymers
Синтетические биоразлагаемые антипирены Synthetic biodegradable flame retardants	Полифосфаты на основе молочной кислоты; сложные эфиры фосфорных кислот; синтетические полимеры с биоразлагаемыми сегментами; био-базирующиеся меламино-фосфатные системы; биофосфонаты Lactic acid-based polyphosphates; phosphoric acid esters; synthetic polymers with biodegradable segments; biobased melamine phosphate systems; biophosphonates	Гидролитическое разложение; выделение фосфорсодержащих ингибиторов пламени; образование вспученного углеродного слоя Hydrolytic decomposition; release of phosphorus-containing flame retardants; formation of an expanded carbon layer

Механизмы огнезащиты биоразлагаемых антипиренов

Механизмы огнезащитного действия биоразлагаемых антипиренов представляют собой сложный комплекс физико-химических процессов, направленных на подавление горения на различных стадиях [12]. По характеру воздействия их традиционно разделяют на механизмы, реализующиеся в конденсированной и газовой фазах, хотя многие биоразлагаемые системы демонстрируют комбинированное действие.

В конденсированной фазе ключевым механизмом является образование стабильного термоизолирующего слоя кокса, угля или золы на поверхности материала. Такой барьер эффективно препятствует проникновению тепла к глубинам материала и затрудняет выход летучих горючих продуктов пиролиза в зону пламени [12]. Например, лигнин, танины и фитаты при термическом разложении карбонизируют

ся, формируя прочный пористый углеродный скелет [13, 14]. ДНК, разлагаясь, выделяет фосфатные группы, которые катализируют реакции дегидратации и структурирования углеродного слоя [15, 16]. Минеральные наполнители, такие как гидроксиды алюминия и магния, также способствуют образованию защитного зольного слоя [12].

Механизмы, реализующиеся в газовой фазе, направлены на ингибирование цепных реакций горения в пламени. Многие биоразлагаемые антипирены при разложении выделяют негорючие газы, такие как водяной пар (H_2O), аммиак (NH_3) или диоксид углерода (CO_2). Эти газы разбавляют концентрацию горючих летучих веществ, поступающих из материала, снижая тем самым скорость горения и тепловыделение. Фосфорсодержащие соединения, включая фитиновую кислоту и различные фосфаты, выделяют в газовую фазу активные радикалы PO и PO_2 , которые эффективно обрывают

цепные реакции окисления, связывая высокоэнергетичные радикалы $H\cdot$ и $OH\cdot$, ответственные за распространение пламени [15–16].

Важную роль играют эндотермические процессы разложения самих антипиренов [12]. Гидроксиды металлов и некоторые гидратированные соединения поглощают значительное количество тепловой энергии в процессе своего разложения, что приводит к охлаждению материала и замедлению его пиролиза. Этот эффект до-

полнительно способствует торможению процесса горения.

Особого внимания заслуживает капля-эффект (*dripping effect*, рис. 1), характерный для кремнийорганических соединений. Некоторые силиконы и силаны [17], имеющие потенциал к биodeградации, при нагревании мигрируют к поверхности полимера, плавятся и образуют сплошной непроницаемый силикатный слой. Этот слой действует как барьер, препятствующий переносу тепла и массы.

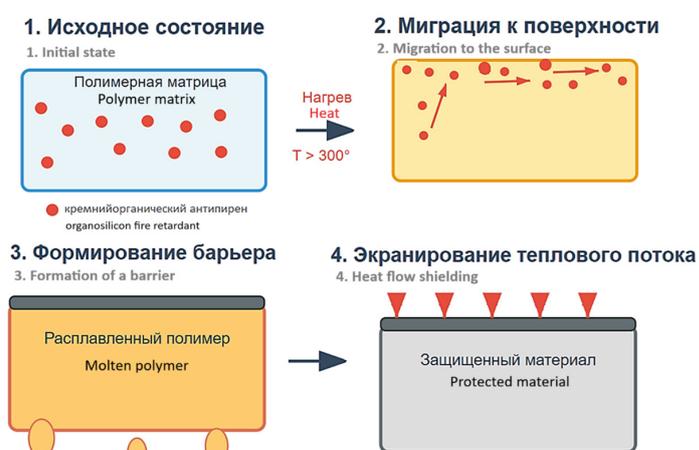


Рис. 1. Схема капля-эффекта, характерного для кремнийорганических антипиренов
Fig. 1. Diagram of the droplet effect characteristic of organosilicon flame-retardants

Критическое значение для эффективности биоразлагаемых антипиренов имеет синергизм — комбинированное использование различных типов добавок, которое приводит к усилению огнезащитного действия, превышающему простую сумму эффектов от каждого компонента в отдельности. Классическими примерами синергичных пар являются комбинации: фосфор — азот и фосфор — кремний. Азотсодержащие соединения (меламин, гуанидин, хитозан) при нагревании выделяют аммиак, который реагирует с фосфорсодержащими компонентами, способствуя вспучиванию образующегося углеродного слоя и формированию более прочного и толстого коксового барьера.

Сочетание биоосновного (*bio-based*) антипирена с минеральным наполнителем часто позволяет значительно снизить общую нагрузку добавок в полимере, сохраняя при этом высокие огнезащитные свойства и улучшая экологический профиль материала. Таким образом, синергизм является мощным инструментом для создания высокоэффективных и экологических огнезащитных систем.

Оценка биоразлагаемости и экотоксичности

Комплексная оценка экологической безопасности биоразлагаемых антипиренов требует проведения двух взаимосвязанных видов исследований: анализа их способности

к разложению в окружающей среде и определения потенциального токсического воздействия на живые организмы [18].

Для определения биоразлагаемости разработан ряд стандартизированных методов тестирования (табл. 2). Международные стандарты OECD серии 301 (A–F) оценивают готовность к биоразложению в водной среде путем измерения потребления кислорода, выделения диоксида углерода или удаления растворенного органического углерода [19]. Стандарты ISO 14851 и 14852 специфицируют методы определения потребления кислорода в закрытом респирометре и анализа выделения углекислого газа соответственно. Для оценки разложения в почве применяются специальные почвенные тесты, моделирующие естественные условия. Ключевыми параметрами при оценке биоразлагаемости являются степень разложения в процентах, время достижения определенного уровня разложения и идентификация промежуточных продуктов распада.

Оценка экотоксичности включает тестирование воздействия на различные уровни водных и наземных экосистем. Стандартные тесты проводятся на дафниях (*Daphnia magna*) для оценки острой и хронической токсичности, на водорослях — для определения ингибирования роста, на рыбах — для анализа токсического воздействия. Для оценки воздействия на почвенные экосистемы используются тесты с дождевыми червями и почвенными микроорганизмами. Особое внимание уделяется оценке генотоксичности с помощью теста Эймса и других методов, выявляющих мутагенные свойства веществ и продуктов их распада [20].

Проведение корректной оценки связано с рядом методологических сложностей. Значительное влияние на результаты тестов

оказывает полимерная матрица, в которую введен антипирен, поскольку она может изменять доступность вещества для микроорганизмов и скорость его высвобождения. Условия окружающей среды, такие как температура, pH и состав микробного сообщества, также существенно влияют на процессы биодеградации. Отдельной проблемой является разработка адекватных методов экстракции антипирена из готового изделия для проведения тестирования, поскольку традиционные методы могут не отражать реальную доступность вещества в окружающей среде [20–21].

Соответствие экологическим стандартам и требованиям является важным аспектом внедрения биоразлагаемых антипиренов. Производители стремятся получить экологические сертификаты и маркировки, такие как *EcoLabel*, *Cradle to Cradle*, которые подтверждают безопасность и экологичность продукции. Однако отсутствие единых стандартов и протоколов, специфических для «зеленых» антипиренов, создает дополнительные вызовы для производителей и исследователей [22].

Таким образом, комплексный подход к оценке биоразлагаемости и экотоксичности является необходимым условием для разработки и успешного внедрения экологически безопасных антипиренов, соответствующих принципам устойчивого развития и «зеленой» химии.

Преимущества и недостатки биоразлагаемых антипиренов

Биоразлагаемые антипирены представляют собой перспективную альтернативу традиционным огнезащитным составам, однако их внедрение сопровождается как значительными преимуществами, так и определенными ограничениями [23].

Таблица 2
Основные стандартизированные методы оценки биоразлагаемости
и экотоксичности биоразлагаемых антипиренов [19–22]

Table 2
 Main standardized methods for assessing the biodegradability
 and ecotoxicity of biodegradable flame retardants [19–22]

Направление оценки Evaluation Direction	Метод/стандарт Method/Standard	Объект тестирования Test Object	Основной параметр Main parameter
Биоразлагаемость в водной среде Biodegradability in aquatic environments	OECD 301 (A–F)	Водная среда, микроорганизмы Aquatic environment, microorganisms	Потребление O ₂ , выделение CO ₂ , снижение содержания DOC ¹ O ₂ consumption, CO ₂ emission, DOC reduction
	ISO 14851	Вода, закрытый респирометр Water, closed respirometer	Потребление кислорода Oxygen consumption
	ISO 14852	Вода, анализ выделившегося газа Water, analysis of released gas	Количество CO ₂ Amount of CO ₂
Биоразлагаемость в почве Biodegradability in soil	OECD 307, ISO 17556	Почвенные микробные сообщества Water, analysis of released gas	Степень минерализации, скорость деградации Degree of mineralization, rate of degradation
Экотоксичность (водные экосистемы) Ecotoxicity (aquatic ecosystems)	OECD 202	Дафнии (<i>Daphnia magna</i>) <i>Daphnia (Daphnia magna)</i>	Острая и хроническая токсичность Acute and chronic toxicity
	OECD 201	Водоросли Seaweed	Ингибирование роста Growth inhibition
	OECD 203	Рыбы Fish	Токсичность, смертность Toxicity, mortality
Экотоксичность (почвенные экосистемы) Ecotoxicity (soil ecosystems)	OECD 207	Дождевые черви Earthworms	Летальность, поведение Lethality, behavior
	ISO 11268	Почвенные микроорганизмы Soil microorganisms	Метаболическая активность Metabolic activity
Генотоксичность Genotoxicity	Тест Эймса Ames test	Бактерии (<i>Salmonella typhimurium</i>) Bacteria (<i>Salmonella typhimurium</i>)	Мутагенный потенциал Mutagenic potential

Ключевым преимуществом биоразлагаемых антипиренов является существенное снижение долгосрочного экологического риска. Способность к разложению в окружающей среде предотвращает их накопление в экосистемах и минимизирует негативное воздействие на природные объекты.

¹ DOC — растворенный органический углерод.

Многие из этих соединений демонстрируют потенциально меньшую токсичность для человека и биоты, особенно при использовании компонентов природного происхождения. Важным аспектом является использование возобновляемого сырья, что снижает зависимость от ископаемых ресурсов и соответ-

ствуется принципам устойчивого развития. Соответствие современным экологическим требованиям и трендам в области «зеленой» химии открывает дополнительные возможности для применения этих материалов в регулируемых отраслях. Кроме того, биоразлагаемые антипирены обладают потенциалом для интеграции в замкнутые производственные циклы, обеспечивая возможность безопасного разложения в конце жизненного цикла изделий [23–26].

Несмотря на экологические преимущества, биоразлагаемые антипирены обладают рядом существенных недостатков. Наиболее значительным ограничением является их эффективность, которая часто уступает традиционным аналогам при одинаковой массовой доле в полимерной матрице, что требует применения более высоких концентраций для достижения сопоставимых показателей огнестойкости. Серьезной проблемой остается совместимость с полимерными материалами, проявляющаяся в трудностях достижения хорошей дисперсности, склонности к миграции на поверхность и негативном влиянии на механические свойства готовых изделий. Стабильность при переработке и эксплуатации представляет еще один вызов, поскольку существует риск преждевременного разложения антипиренов при высоких температурах обработки или под действием УФ-излучения и влаги. Стоимость биоразлагаемых антипиренов часто превышает цену традиционных решений, особенно для сложных многокомпонентных систем, что ограничивает их коммерческое применение [23–25].

Дополнительной сложностью является достижение комплексных требований, включающих одновременное обеспечение высокой огнестойкости, сохранение меха-

нических характеристик, технологичность переработки, гарантированную биоразлагаемость и низкую экотоксичность. Отсутствие единых стандартов для оценки «зеленых» антипиренов создает неопределенность для производителей и затрудняет объективное сравнение различных продуктов. Влияние полимерной матрицы на процесс биоразложения также требует дополнительного изучения, поскольку скорость и механизм разложения могут значительно варьироваться в зависимости от типа основного материала [23–26].

Таким образом, несмотря на очевидные экологические преимущества, широкое внедрение биоразлагаемых антипиренов сдерживается технологическими и экономическими ограничениями, что требует дальнейших исследований и оптимизации их состава и свойств.

Области применения биоразлагаемых антипиренов

Биоразлагаемые антипирены (рис. 2) находят применение в различных отраслях промышленности (рис. 3), где сочетание требований пожарной безопасности и экологической совместимости становится критически важным. Их использование особенно востребовано в секторах, ориентированных на принципы устойчивого развития и экономики замкнутого цикла [11].

В строительной отрасли и производстве изоляционных материалов биоразлагаемые антипирены применяются для повышения огнестойкости пенополиуретановых (ППУ) и пенополиизоциануратных (ПИР) пенопластов, используемых в качестве теплоизоляции. Они также востребованы при производстве древесно-полимерных композитов (ДПК) для наружного

и внутреннего использования, а также для огнезащитной обработки текстильных уте-

плителей и натуральных строительных материалов [12].

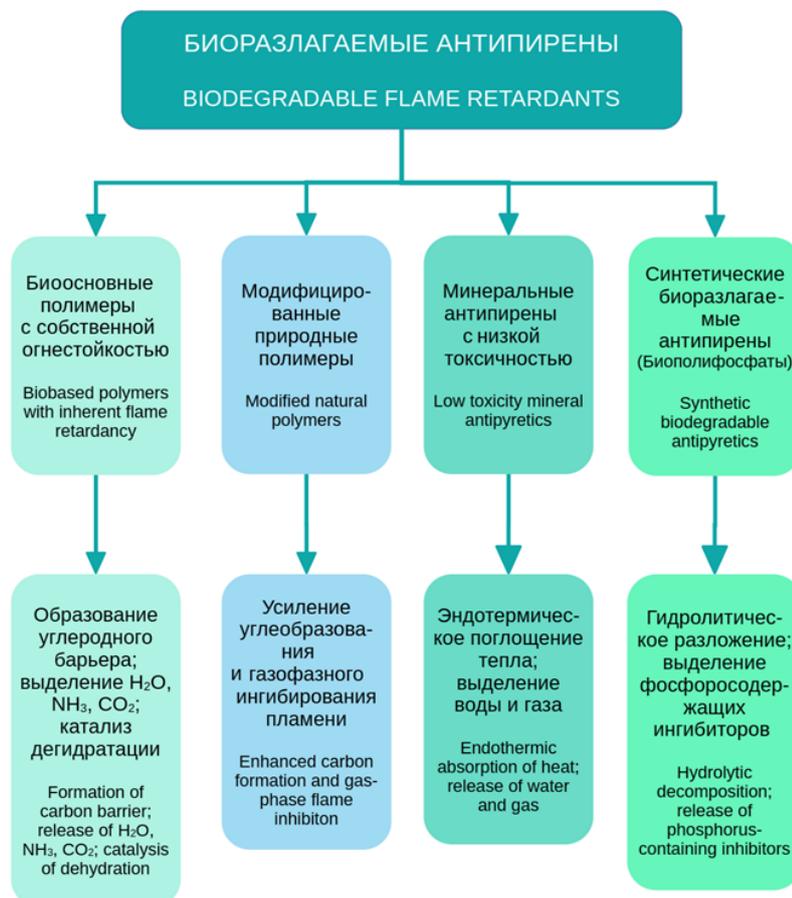


Рис. 2. Классификация биоразлагаемых антипиренов

Fig. 2. Applications of biodegradable flame retardants

Текстильная промышленность представляет значительный потенциал для применения биоразлагаемых антипиренов. Они используются для огнезащитной отделки натуральных тканей на основе хлопка и льна, а также нетканых материалов [27]. Основные области применения включают производство специализированной рабочей одежды для пожароопасных производств, домашнего текстиля (шторы, ковры, мебельные ткани) и интерьерных решений для общественных пространств.

В электронике и электротехнике биоразлагаемые антипирены находят ограниченное, но растущее применение. Они используются при производстве оболочек кабелей и про-

водов, где требования к экологической безопасности особенно важны. Для корпусов электронных устройств их применение сдерживается требованиями термостабильности, но активно исследуется для устройств с невысокими тепловыми нагрузками [11].

Автомобильная промышленность и транспорт в целом демонстрируют растущий интерес к биоразлагаемым антипиренам. Они применяются при производстве деталей интерьера транспортных средств, где особенно ценным является свойство снижения токсичности газов, выделяемых при горении. Это соответствует ужесточающимся требованиям к безопасности пассажиров и экипажа в случае возгорания [24].

Упаковочная отрасль представляет особый интерес для применения биоразлагаемых антипиренов. Производители упаковки сталкиваются с противоречивыми требованиями: с одной стороны, необходимо обеспечить огнестойкость при хранении и транспортировке, с другой — соблюсти требования экологической безопасности и возможности утилизации. Биоразлагаемые антипирены позволяют создавать упаковочные материалы, соответствующие указанным требованиям [9].

Перспективной областью применения является аддитивное производство (3D-печать). Разрабатываются специальные огнезащит-

ные биоразлагаемые филаменты на основе полилактида (ПЛА) и других биополимеров, которые могут использоваться для печати конструкций, требующих определенного уровня огнестойкости. Это направление особенно актуально для прототипирования и производства специализированных изделий [25].

Во всех этих областях применение биоразлагаемых антипиренов не только улучшает экологический профиль продукции, но и соответствует растущему потребительскому спросу на устойчивые и безопасные материалы, а также нормативным требованиям в области охраны окружающей среды и здоровья человека.



Рис. 3. Сферы применения биоразлагаемых антипиренов

Fig. 3. Applications of biodegradable flame retardants

Перспективы биоразлагаемых антипиренов

Развитие биоразлагаемых антипиренов характеризуется динамичным ростом и междисциплинарным подходом, объединяющим достижения химии, материаловедения и биотехнологий. Ключевым трендом становится

интеллектуальный дизайн молекул с заданными свойствами — высокой огнезащитной эффективностью и контролируемой биоразлагаемостью. Исследования в этой области направлены на создание «умных» систем, способных сохранять стабильность в процессе эксплуатации и быстро разлагаться после окончания срока службы изделия [6–11, 21–23].

Значительный потенциал связан с применением нанотехнологий. Наночастицы, такие как слоистые двойные гидроксиды (ЛДГ), наноглина и производные целлюлозы, демонстрируют синергетический эффект в комбинации с органическими антипиренами, позволяя снизить общую нагрузку добавок и улучшить механические свойства композитов. Нановолокна на основе хитина и целлюлозы не только повышают огнестойкость, но и способствуют биоразлагаемости материала.

Биоинженерия открывает новые возможности для получения экологичных антипиренов. Ферментативный синтез позволяет создавать сложные молекулы с высокой селективностью и минимальным образованием побочных продуктов. Использование генетически модифицированных микроорганизмов для производства биологических прекурсоров антипиренов представляет собой перспективное направление, способное снизить стоимость и увеличить доступность этих материалов [10, 23, 24].

Разработка многофункциональных покрытий становится отдельным значимым трендом. Современные исследования направлены на создание систем, сочетающих огнезащитные свойства с антимикробной активностью, гидрофобностью и самоочищающейся способностью. Такие решения особенно востребованы в медицине, строительстве и производстве специализированного текстиля [27].

Особое внимание уделяется разработке систем с управляемым сроком службы и биоразложением. Химически модифицированные антипирены, чувствительные к определенным факторам окружающей среды (рН, температура, наличие специфических ферментов), позволяют контролировать

процесс деградации материала после его вывода из эксплуатации [23, 25, 26].

Рыночные прогнозы указывают на устойчивый рост сегмента биоразлагаемых антипиренов, обусловленный ужесточением экологического законодательства и изменением потребительских предпочтений. Ожидается, что в ближайшие пять лет ежегодный рост этого рынка составит 8–12 %. Основной фокус разработок будет сосредоточен на достижении оптимального баланса между эффективностью, стоимостью и экологической безопасностью [25, 26].

Развитие стандартизации и сертификации «зеленых» антипиренов станет определяющим фактором для их широкого внедрения. Международные организации активно работают над созданием единых протоколов тестирования и критериев оценки, что позволит объективно сравнивать различные продукты и технологии.

В перспективе успешное развитие направления биоразлагаемых антипиренов будет определяться междисциплинарными коллаборациями между химиками-синтетиками, специалистами по полимерным материалам, биотехнологами и экологами. Интеграция принципов экономики замкнутого цикла в процесс разработки новых материалов станет ключевым условием для создания действительно устойчивых и безопасных огнезащитных систем.

Заключение

Биоразлагаемые антипирены представляют собой динамично развивающееся направление в области создания современных огнезащитных материалов, соответствующее принципам устойчивого развития и «зеленой» химии. Проведенный

анализ демонстрирует, что, несмотря на существующие технологические вызовы, разработка и внедрение таких систем являются необходимым шагом для снижения экологического следа материалов при обеспечении требуемого уровня пожарной безопасности.

Основные усилия исследователей сосредоточены на создании эффективных синергетических систем на основе возобновляемого сырья, сочетающих различные механизмы огнезащитного действия. Значительный прогресс достигнут в разработке интеллектуальных молекулярных структур с контролируемой биоразлагаемостью, нанокompозитов и многофункциональных покрытий. Однако сохраняются вызовы, связанные с обеспечением баланса между огнезащитной эффективностью, эксплуатационными характеристиками полимерных композитов и их экологической безопасностью.

Перспективы дальнейшего развития направления связаны с применением пе-

редовых подходов, включая компьютерный дизайн молекул, нанотехнологии и биотехнологические методы синтеза. Особое значение приобретает разработка единых стандартов и протоколов оценки, а также создание нормативной базы, регламентирующей использование биоразлагаемых антипиренов в различных отраслях промышленности.

Успешная коммерциализация и широкое внедрение биоразлагаемых антипиренов будут определяться коллаборацией специалистов в области химии, науки о материалах, биологии и экологии. Интеграция таких решений в практику позволит не только повысить пожарную безопасность материалов и изделий, но и обеспечить их соответствие принципам циркулярной экономики и устойчивого развития, что является необходимым для создания безопасной и экологически ответственной технологической среды будущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Егоров А. Н., Криволапова Е. В. Проблемы горючести полимерных материалов // В мире научных открытий. 2015. № 2-1 (62). С. 654–659.
2. Курбанова Э. К. Экологическая безопасность антипиренов // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2025. № 2 (18). С. 16–20. DOI: 10.34987/2712-9233.2025.13.70.003
3. Замедлители горения для полимеров / С. М. Ломакин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 7. С. 71–86.
4. Production of eco-safe, highly efficient and cheap fire-protective materials of new type / L. Gurchumelia et al. // Kimya Problemleri. 2016. No. 4. Pp. 372–376.
5. Бобрышева С. Н., Подобед Д. Л., Кашлач Л. О. Влияние антипиренов на свойства композитов // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. 2013. Т. 8, № 2. С. 51–57.
6. Chen M., Wang H., Li Z. Bio-based flame retardants for sustainable materials // Polymers. 2025. Vol. 17. No. 2. DOI: 10.3390/polym17020249

7. Flame retardancy of densified wood modified by bio-material based flame retardant / Y. Gao et al. // *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. Pp. 3671–3688. DOI: 10.1007/s10694-024-01594-w
8. Malucelli G. Flame-retardant systems based on chitosan and its derivatives: state of the art and perspectives // *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 18. DOI: 10.3390/molecules25184046
9. Maqsood M., Seide G. Biodegradable flame retardants for biodegradable polymer // *Biomolecules*. 2020. Vol. 10. No. 7. DOI: 10.3390/biom10071038
10. Recent advances in biomass phytic acid flame retardants / Y. Liu et al. // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108100
11. Bio-based flame retardants to polymers: a review / M. Wang et al. // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. Vol. 6. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.07.003
12. Fu S., Song P., Liu X. Thermal and flame retardancy properties of thermoplastics/natural fiber biocomposites // *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Woodhead Publishing, 2017. Pp. 479–508. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00019-4
13. Brebu M., Tamminen T., Spiridon I. Thermal degradation of various lignins by TG-MS/FTIR and Py-GC-MS // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. Vol. 104. Pp. 531–539. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.016
14. Daneluti M., Matos J. Study of thermal behavior of phytic acid // *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2013. Vol. 49. Pp. 275–283. DOI: 10.1590/S1984-82502013000200009
15. Phosphorus–nitrogen interaction in fire retardants and its impact on the chemistry of treated wood / W. Grześkowiak et al. // *Materials*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.3390/ma17215283
16. ScharTEL B. Phosphorus-based flame retardancy mechanisms — old hat or a starting point for future development? // *Materials*. 2010. Vol. 3. No. 10. Pp. 4710–4745. DOI: 10.3390/ma3104710
17. A novel phosphorus-nitrogen-based hyperbranched polysiloxane for improving the fire safety of PA6 / S. Fan et al. // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22877
18. Toward the future of OECD/ISO biodegradability testing — new approaches and developments / U. Strotmann et al. // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2023. Vol. 107. No. 7–8. Pp. 2073–2095. DOI: 10.1007/s00253-023-12406-6
19. Investigation of OECD 301F ready biodegradability test to evaluate chemical fate in a realistic environment / S. Takekoshi et al. // *Journal of Pesticide Science*. 2021. Vol. 46. No. 2. Pp. 143–151. DOI: 10.1584/jpestics.D20-050
20. Ezechiáš M., Covino S., Cajthaml T. Ecotoxicity and biodegradability of new brominated flame retardants: a review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 110. Pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.08.030
21. Multi-laboratory evaluation of the reproducibility of polymer biodegradation assessments applying standardized and modified respirometry methods / K. McDonough et al. // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166339
22. Jones L., Arnold K., Allchin O. Evidence on the effects of flame retardant substances at ecologically relevant endpoints: a systematic map protocol // *Evidence-Based Toxicology*. 2024. Vol. 2. DOI: 10.1080/2833373X.2024.2375113
23. Rethinking the pathway to sustainable fire retardants / J. Feng et al. // *Exploration*. 2023. Vol. 3. No. 4. DOI: 10.1002/EXP.20220088

24. Functional additives in automotive polymer matrices: compatibility, mechanisms, and industry challenges / D. Dobrotă et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. DOI: 10.3390/polym17172328
25. A nimble strategy for enabling bioderived flame retardants with strikingly enhanced interfacial compatibility in poly (lactic acid) composites / L. Yi et al. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 270. Pt. 1. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132260
26. Eco-conscious flame retardants for enhanced fire resistance in natural fiber reinforced polymers composite: a review / A. Morsy et al. // *Chemosphere*. 2025. Vol. 377. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144360
27. The gas- and condensed-phase efficacy of functionalized phosphorus flame retardants for cotton fabric: phenyl vs. phenoxy groups / R. Otto et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 7. DOI: 10.3390/polym17070924

REFERENCES

1. Egorov A. N., Krivolapova E. V. Problems of flammability of polymeric materials // *In the world of scientific discoveries*. 2015. No. 2-1 (62). Pp. 654–659.
2. Kurbanova E. K. Environmental safety of flame retardants // *Actual problems of safety in the technosphere*. 2025. No. 2 (18). Pp. 16–20. DOI 10.34987/2712-9233.2025.13.70.003
3. Flame retardants for polymers / S. M. Lomakin et al. // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012. Vol. 15. No. 7. Pp. 71–86.
4. Production of eco-safe, highly efficient and cheap fire-protective materials of new type / L. Gurchumelia et al. // *Kimya Problemleri*. 2016. No. 4. Pp. 372–376.
5. Bobrysheva S. N., Podobed D. L., Kashlach L. O. Reducing the flammability of polymeric materials // *Emergencies: education and science*. 2013. Vol. 8. No. 2. Pp. 51–57.
6. Chen M., Wang H., Li Z. Bio-based flame retardants for sustainable materials // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 2. DOI: 10.3390/polym17020249
7. Flame retardancy of densified wood modified by bio-material based flame retardant / Y. Gao et al. // *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. Pp. 3671–3688. DOI: 10.1007/s10694-024-01594-w
8. Malucelli G. Flame-retardant systems based on chitosan and its derivatives: state of the art and perspectives // *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 18. DOI: 10.3390/molecules25184046
9. Maqsood M., Seide G. Biodegradable flame retardants for biodegradable polymer // *Biomolecules*. 2020. Vol. 10. No. 7. DOI: 10.3390/biom10071038
10. Recent advances in biomass phytic acid flame retardants / Y. Liu et al. // *Polymer Testing*. 2023. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108100
11. Bio-based flame retardants to polymers: a review / M. Wang et al. // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. Vol. 6. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.07.003
12. Fu S., Song P., Liu X. Thermal and flame retardancy properties of thermoplastics/natural fiber biocomposites // *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*. Woodhead Publishing, 2017. Pp. 479–508. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00019-4
13. Brebu M., Tamminen T., Spiridon I. Thermal degradation of various lignins by TG-MS/FTIR and Py-GC-MS // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. Vol. 104. Pp. 531–539. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.016

14. Daneluti M., Matos J. Study of thermal behavior of phytic acid // *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2013. Vol. 49. Pp. 275–283. DOI: 10.1590/S1984-82502013000200009
15. Phosphorus–nitrogen interaction in fire retardants and its impact on the chemistry of treated wood / W. Grzeškowiak et al. // *Materials*. 2024. Vol. 17. DOI: 10.3390/ma17215283
16. Schartel B. Phosphorus-based flame retardancy mechanisms — old hat or a starting point for future development? // *Materials*. 2010. Vol. 3. No. 10. Pp. 4710–4745. DOI: 10.3390/ma3104710
17. A novel phosphorus-nitrogen-based hyperbranched polysiloxane for improving the fire safety of PA6 / S. Fan et al. // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e22877
18. Toward the future of OECD/ISO biodegradability testing — new approaches and developments / U. Strotmann et al. // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2023. Vol. 107. No. 7–8. Pp. 2073–2095. DOI: 10.1007/s00253-023-12406-6
19. Investigation of OECD 301F ready biodegradability test to evaluate chemical fate in a realistic environment / S. Takekoshi et al. // *Journal of Pesticide Science*. 2021. Vol. 46. No. 2. Pp. 143–151. DOI: 10.1584/jpestics.D20-050
20. Ezechiáš M., Covino S., Cajthaml T. Ecotoxicity and biodegradability of new brominated flame retardants: a review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 110. Pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.08.030
21. Multi-laboratory evaluation of the reproducibility of polymer biodegradation assessments applying standardized and modified respirometry methods / K. McDonough et al. // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166339
22. Jones L., Arnold K., Allchin O. Evidence on the effects of flame retardant substances at ecologically relevant endpoints: a systematic map protocol // *Evidence-Based Toxicology*. 2024. Vol. 2. DOI: 10.1080/2833373X.2024.2375113
23. Rethinking the pathway to sustainable fire retardants / J. Feng et al. // *Exploration*. 2023. Vol. 3. No. 4. DOI: 10.1002/EXP.20220088
24. Functional additives in automotive polymer matrices: compatibility, mechanisms, and industry challenges / D. Dobrotá et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. DOI: 10.3390/polym17172328
25. A nimble strategy for enabling bioderived flame retardants with strikingly enhanced interfacial compatibility in poly (lactic acid) composites / L. Yi et al. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 270. Pt. 1. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132260
26. Eco-conscious flame retardants for enhanced fire resistance in natural fiber reinforced polymers composite: a review / A. Morsy et al. // *Chemosphere*. 2025. Vol. 377. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144360
27. The gas- and condensed-phase efficacy of functionalized phosphorus flame retardants for cotton fabric: phenyl vs. phenoxy groups / R. Otto et al. // *Polymers*. 2025. Vol. 17. No. 7. DOI: 10.3390/polym17070924

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Якубова Татьяна Валерьевна, канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры химии и процессов горения Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург,

ул. Мира, д. 22); РИНЦ ID: 488997; ORCID: 0009-0006-1880-8368; e-mail: tatanaakubova71723@gmail.com

Шкуро Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологий ЦБП и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета (620100, Российская Федерация, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37); РИНЦ ID: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ResearcherID: A-2772-2014; ORCID: 000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Плюснин Григорий Александрович, преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: reno499@yandex.ru

Хатыпов Денис Акрамович, преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России (620062, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22); e-mail: den-xatypov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana V. Yakubova, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Combustion Processes, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); ID RSCI: 488997; ORCID: 0009-0006-1880-8368; e-mail: tatanaakubova71723@gmail.com

Aleksey 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, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation); ID RSCI: 652044; Scopus AuthorID: 56151722700; ResearcherID: A-2772-2014; ORCID: 000-0002-0469-2601; e-mail: shkuroae@m.usfeu.ru

Grigory A. Plyusnin, Lecturer of the Department of Fire, Emergency rescue equipment and special technical means, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: reno499@yandex.ru

Denis A. Khatypov, Lecturer of the Department of Fire, Emergency rescue equipment and special technical means, UISFS of EMERCOM of Russia (22 Mira St., Yekaterinburg, 620062, Russian Federation); e-mail: den-xatypov@mail.ru