

УДК 678.048.9

ПОЛИМЕРЫ С ПРИВИТЫМИ АНТИПИРЕНАМИ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Якубова Татьяна Валерьевна¹, Шкуро Алексей Евгеньевич²

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

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

Аннотация. Полимеры с привитыми антипиренами (ППА, PGFR) представляют собой особый класс огнестойких материалов, в которых антипиренные фрагменты химически закреплены в структуре полимера. Это обеспечивает ковалентную фиксацию антипиренов, существенно снижает их миграцию и значительно повышает долговечность и термическую стабильность материалов в различных условиях эксплуатации. В настоящей работе представлены современные методы синтеза ППА, включая стратегии grafting from (прививка от), grafting onto (прививка на) и grafting through (прививка через), подробно описаны их механизмы и основные области применения. Особое внимание уделено фосфорорганическим соединениям как наиболее эффективным компонентам привитых систем. Рассмотрены основные механизмы огнезащитного действия, включая ингибирование радикальных реакций, образование защитного углеродного слоя и другие важные процессы. Обоснованы преимущества ППА по сравнению с традиционными добавками, в том числе с позиций экологической и санитарной безопасности, а также с точки зрения экономической эффективности. Обсуждаются существующие ограничения, такие как технологическая сложность синтеза и высокая стоимость, а также перспективные направления дальнейших исследований в области разработки высокоэффективных и экологичных антипиренов нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: полимеры, антипирены, привитые системы, огнестойкость, термостабилизация, радикальное разложение, фосфорорганические соединения, экологическая безопасность

Для цитирования: Якубова Т. В., Шкуро А. Е. Полимеры с привитыми антипиренами: синтез, свойства и перспективы применения // Техносферная безопасность. 2026. № 2 (51). С. 46–61.

POLYMER-GRAFTED FLAME RETARDANTS: SYNTHESIS, PROPERTIES, AND APPLICATION PROSPECTS

Tatiana V. Yakubova¹, Alexey E. Shkuro²

¹ UISFS of EMERCOM of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

² Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Polymers with grafted flame retardants (PPA, PGFR) are a special class of fire-resistant materials in which flame retardant fragments are chemically fixed in the polymer structure. This ensures covalent fixation of flame retardants, significantly reduces their migration and significantly increases the durability and thermal stability of materials under various operating conditions. This paper presents modern methods for the synthesis of PGFR, including grafting from, grafting onto and grafting through strategies, and describes in detail their mechanisms and main areas of application. Particular attention is paid to organophosphorus compounds as the most effective components of grafted systems. The main mechanisms of fire-retardant action are considered, including inhibition of radical reactions, formation of a protective carbon layer and other important processes. The advantages of PGFR compared to traditional additives are substantiated, including from the standpoint of environmental and sanitary safety, as well as from the point of view of economic efficiency. Existing limitations, such as the technological complexity of synthesis and high cost, as well as promising areas of further research in the field of developing highly effective and environmentally friendly new-generation fire retardants with improved performance characteristics are also discussed.

Keywords: polymers, flame retardants, grafted systems, fire resistance, PGFR, thermal stabilization, radical degradation, phosphorus-containing compounds, environmental safety

For citation: Yakubova T. V., Shkuro A. E. Polymer-Grafted Flame Retardants: Synthesis, Properties, and Application Prospects // *Technosphere safety*. 2026. No. 2 (51). P. 46–61.

Введение

Полимерные материалы широко применяются в строительстве, транспорте, электронике, упаковке и текстильной промышленности благодаря их легкости, технологичности и широкому диапазону свойств. Однако большинство синтетических полимеров обладает высокой горючестью, что существенно ограничивает их применение в условиях, требующих повышенной огнестойкости. Для снижения воспламеняемости в полимерные системы традиционно вводят антипирены — добавки, способные ингибировать процессы горения за счет различных физических и химических механизмов [1, 2].

Наиболее распространенные аддитивные (т. е. применяемые в форме добавок) антипирены (фосфор-, азот-, галоген- и крем-

нийсодержащие соединения) эффективны, но имеют ряд существенных недостатков: склонность к миграции, ухудшение механических и эксплуатационных характеристик материала, а также возможность образования токсичных продуктов разложения. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых, более стабильных и безопасных систем огнезащиты [3–5].

Одним из перспективных направлений является создание полимеров с привитыми антипиренами (ППА, polymer-grafted flame retardants, PGFR), в которых антипиренные фрагменты соединены ковалентными связями с полимерной цепью [6]. Такая стратегия позволяет обеспечить долговременную огнезащиту без ухудшения физико-механических свойств, повысить термическую стабильность материала и снизить экологические риски,

связанные с вымыванием и деградацией добавок [7].

Настоящая статья представляет собой обзор современных подходов к синтезу ППА, их классификации, структурных особенностей, механизмов действия и областей применения. Особое внимание уделено преимуществам привитых антипиренов по сравнению с традиционными системами, а также существующим ограничениям и перспективам развития в данной области.

Классификация антипиренов

Антипирены классифицируются по химической природе на несколько основных групп: фосфор-, азот-, галоген- и кремнийорганические соединения, каждая из которых реализует специфические механизмы огнезащитного действия [8–10]. Наиболее широко применяются фосфорсодержащие антипирены, включая фосфаты, фосфонаты и производные *9,10*-дигидро-*9*-окса-*10*-фосфофантрен-*10*-оксида (DOPO), которые действуют преимущественно в конденсированной фазе, способствуя образованию углеродистого защитного слоя, а также ингибируют радикальные процессы в газовой фазе [11]. Азотсодержащие антипирены, такие как меламин и его производные, обеспечивают огнезащиту за счет термического разложения с выделением инертных газов (N_2 , NH_3), разбавляющих горючую среду и препятствующих распространению пламени. Галогенсодержащие антипирены, преимущественно броморганические соединения (например, декабромдифенилэфир, тетрабромбисфенол А), эффективны в газовой фазе [12], где они ингибируют цепные радикальные реакции, но ограничиваются в применении

из-за высокой токсичности продуктов их термодеструкции.

В качестве экологически безопасной альтернативы рассматриваются кремнийорганические антипирены, включая силоксаны и органосиланы, которые улучшают термостабильность и способствуют формированию барьерного слоя из термостойких кремнийсодержащих остатков [13]. Кроме того, активно исследуются комбинированные антипиренные системы (например, P–N, P–Si, P–N–Si), демонстрирующие синергетический эффект и особенно перспективные для разработки полимеров с привитыми антипиренами.

Антипирены также могут быть классифицированы по механизму огнезащитного действия на три основные группы: физические, химические и барьерные системы. Физические антипирены обеспечивают защиту за счет изменения тепловых и фазовых характеристик полимера, таких как охлаждение, разбавление горючих газов и образование защитного слоя, что замедляет передачу тепла и доступ кислорода к поверхности. К этой группе относятся, например, гидратированные соединения, выделяющие воду при нагревании, и газообразующие вещества. Химические антипирены воздействуют на радикальные процессы горения, прерывая цепные реакции в газовой фазе с помощью ингибирования активных радикалов. К ним относятся галогенорганические соединения, фосфорсодержащие и азотсодержащие вещества, действующие через образование летучих радикально-поглощающих продуктов. Барьерные антипирены создают физико-химические барьеры на поверхности материала или в его структуре, препятствуя доступу кислорода и распространению огня. К таким системам относятся силикатные и кремнийорганические соединения, а также вещества,

способствующие формированию углеродистых или кремнийсодержащих защитных слоев при термическом разложении [14, 15]. Часто в современных материалах применяются комбинированные антипирены, сочетающие несколько механизмов действия для достижения высокой эффективности огнезащиты [16].

Антипирены традиционно вводятся в полимеры двумя основными способами: как аддитивные добавки или посредством прививки (*grafting*) к полимерной матрице. Аддитивные антипирены обычно смешиваются с полимером физически и не связаны с его макромолекулами. Их основным преимуществом является простота внедрения и широкий ассортимент доступных соединений. Однако аддитивные антипирены имеют склонность к миграции и вымыванию, что снижает долговечность огнезащитного эффекта и может приводить к ухудшению механических свойств материала. Кроме того, высокая концентрация добавок может негативно влиять на процесс переработки и конечные свойства полимера. В противоположность этому привитые антипирены химически связаны с полимерной цепью, что значительно снижает миграцию и улучшает совместимость с матрицей. Это обеспечивает стабильный и долговременный огнезащитный эффект при более низких концентрациях. Кроме того, привитые системы часто демонстрируют улучшенные механические и термические свойства, так как интегрируются в полимерную структуру [17, 18]. Недостатками ППА являются более сложные методы синтеза и, как правило, более высокая стоимость. Таким образом, выбор между аддитивными и привитыми антипиренами определяется требованиями к долговечности, технологичности и стоимости конечного материала.

Методы синтеза привитых антипиренов

Методы прививки антипиренов к полимерной матрице традиционно подразделяются на три основные категории (рис.): *grafting from* (прививка от), *grafting onto* (прививка на) и *grafting through* (прививка через) [19–21].

Метод *grafting from* предполагает иницирование полимеризации функционализированных антипиренами мономеров непосредственно с поверхности полимерной цепи, на которую предварительно введены активные центры инициации. Такой подход обеспечивает высокую плотность привитых фрагментов и равномерное распределение огнезащитных групп, а также минимизирует проблемы, связанные с диффузией мономеров.

Метод *grafting onto* заключается в химическом присоединении заранее синтезированных полимерных цепей с антипиренными функциями к функциональным группам полимерной матрицы. Несмотря на простоту реализации, данный способ часто ограничен низкой степенью замещения из-за стерических препятствий при присоединении крупных молекул.

Метод *grafting through* предусматривает включение функционализированных антипиренных мономеров непосредственно в основную полимерную цепь посредством совместной полимеризации с основными мономерами, что позволяет получать сополимеры с интегрированными огнезащитными группами и контролируемой структурой. Выбор конкретного метода определяется природой полимера, типом антипирена и требованиями к конечным свойствам материала.

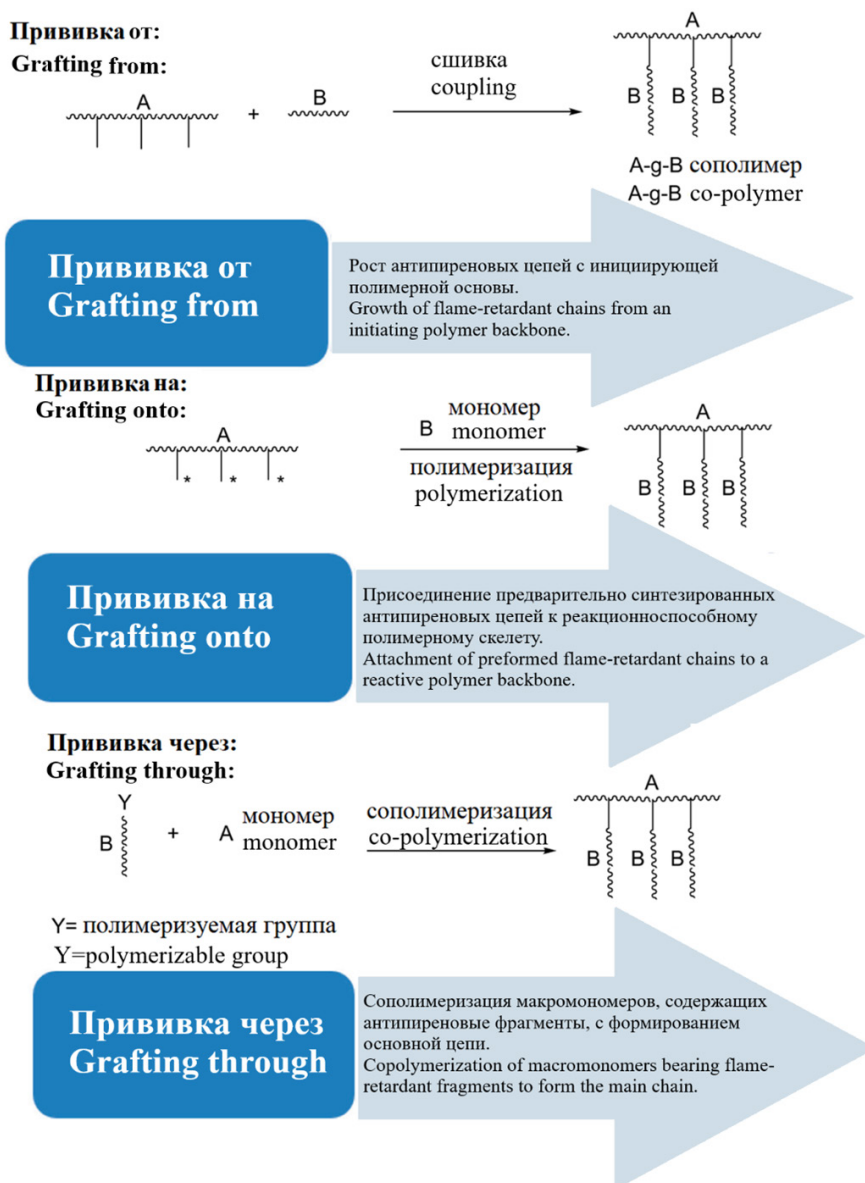


Рис. Методы прививки антипиренов к полимерной матрице [19]

Fig. Methods of grafting fire retardants to a polymer matrix [19]

Привитые антипирены получают путем химического связывания огнезащитных групп или молекул с полимерной матрицей, что позволяет повысить совместимость, снизить миграцию и улучшить долговечность антипиренного эффекта. Основные методы синтеза привитых антипиренов:

- Радикальная полимеризация с участием антипиренов — один из наиболее распространенных способов, при котором молекулы антипиренов или их функционализированные производные участвуют в радикальной сополимеризации

с мономерами. Это позволяет формировать химическую связь антипирена с полимерной цепью в процессе полимеризации или последующей гомополимеризации, обеспечивая равномерное распределение функциональных групп.

- Химическая модификация готовых полимеров. В данном методе функциональные группы антипиренов вводятся в уже синтезированный полимер посредством замещения, аминирования, этерификации, раскрытия циклов или других типов реакций. Такой подход позволяет

гибко модифицировать существующие полимерные материалы и оптимизировать структуру привитого антипирена.

– «Клик-химия». Высокоэффективные и селективные реакции, такие как азидо-алкиновое циклообразование (CuAAC), широко используются для прививки антипиренов к функционализированным полимерам. «Клик-реакции» отличаются высокой степенью конверсии, мягкими условиями проведения и минимальным образованием побочных продуктов [22–24].

– Иницированные электронообменные реакции (*Atom Transfer Radical Polymerization, ATRP*). Метод позволяет синтезировать привитые антипирены с заданной архитектурой и молекулярной массой, обеспечивая высокую точность распределения функциональных групп и возможность получения блок-сополимеров с антипиренами [25, 26].

– Полимеризация в расплаве или растворе с одновременной функционализацией. Метод предусматривает проведение полимеризационных реакций с одновременным введением антипиренных групп, что обеспечивает их стабильное включение и равномерное распределение без необходимости последующей модификации.

Выбор конкретного метода определяется природой полимера, типом антипирена, желаемыми свойствами конечного материала и технологическими возможностями.

Структура и свойства привитых антипиренных систем

Химическая структура привитых фрагментов в полимерах с антипиренными

свойствами определяется как природой функционального антипирена, так и способом его введения в полимерную цепь. Чаще всего для этих целей используют фрагменты, содержащие фосфор-, азот- или галогенсодержащие группы, обладающие способностью к ингибированию процессов горения. Наиболее широко применяются производные DOPO (9,10-дигидро-9-оксафосфотантрен-10-оксид), фосфонов, фосфатов, а также фосфониевых солей, благодаря их термической стабильности и высокой реакционной способности. Такие структуры часто включают винильные, эпоксидные, гидроксильные или аминогруппы, которые могут взаимодействовать с полимерной матрицей при прививке.

В методах *grafting from* и *grafting onto* структуры привитых фрагментов обычно включают как реакционноспособную группу, так и антипиренный фрагмент, соединенные между собой гибкой или жесткой связующей цепью. В подходе *grafting through* антипиренный мономер содержит полимеризуемую двойную связь, что позволяет ему включаться в основную цепь в процессе сополимеризации. Формирование таких привитых структур обеспечивает ковалентную фиксацию антипирена в полимерной матрице, что значительно снижает его миграцию, а также способствует повышению термической и огнестойкой стабильности материала.

Прививка антипиренных фрагментов к полимерной матрице оказывает комплексное влияние на физико-химические свойства материала. С точки зрения термической стабильности ковалентная фиксация антипирена снижает температуру начала термодеструкции по сравнению с исходным полимером, однако делает процесс

разложения более контролируемым и менее экзотермичным за счет ингибирования цепных реакций. Это особенно выражено при использовании фосфорорганических антипиренов, таких как производные DOPO, которые способствуют образованию термостойких фосфорсодержащих остатков.

Механические свойства модифицированных полимеров зависят от природы привитого фрагмента и плотности его прививки: в большинстве случаев наблюдается умеренное снижение прочности и модуля упругости из-за нарушения регулярности полимерной цепи, однако возможно и улучшение адгезионных характеристик или гибкости за счет введения полярных или гибкоцепных фрагментов.

Наиболее выраженное влияние прививка оказывает на огнестойкость: ковалентно связанные антипирены не мигрируют, обеспечивая длительный эффект и стабильную защиту. Такие материалы демонстрируют снижение показателей горючести, снижение дымовыделения, увеличение времени до воспламенения и образование защитного углеродистого слоя на поверхности при термодеструкции. Таким образом, применение привитых антипиренов позволяет достичь баланса между эффективной огнезащитой и сохранением эксплуатационных свойств полимеров [27–29].

Введение привитых антипиренов в состав полимерных композитов оказывает значительное влияние на морфологию материала и характер межфазных взаимодействий. Благодаря ковалентной фиксации антипиренных фрагментов к полимерной матрице улучшается совместимость между компонентами композита, особенно в системах, содержащих неорганические наполнители (например, оксиды, наноглины, волокна) или натуральные компоненты [15, 30, 31].

Привитые цепи могут выполнять роль межфазных связующих звеньев, способствуя снижению межфазного натяжения, равномерному распределению наполнителя и формированию устойчивой структурной морфологии. Это приводит к более мелкодисперсной морфологии, повышению когезии на границе раздела фаз и уменьшению вероятности дефектов или расслоений при деформации. Наличие функциональных групп в структуре привитых антипиренов (фосфонатов, аминов, гидроксидов) способствует образованию водородных или донорно-акцепторных связей с поверхностью наполнителей, что дополнительно укрепляет межфазную адгезию. В результате таких взаимодействий повышается термостойкость композитов, улучшаются их механические характеристики и огнезащитные свойства за счет образования интегрированной и более стабильной морфологической структуры. Таким образом, прививка антипиренов играет не только огнезащитную, но и структурообразующую роль в композиционных материалах [32].

Одним из ключевых преимуществ привитых антипиренов по сравнению с аддитивными является их высокая стабильность в составе полимера и стойкость к миграции. Ковалентное связывание антипиренного фрагмента с основной полимерной цепью предотвращает его вымывание, испарение или выделение на поверхность материала в процессе эксплуатации, особенно при воздействии тепла, влаги, растворителей или механических нагрузок. Это особенно важно для обеспечения долговременной огнезащиты, поскольку в традиционных системах с физически введенными антипиренами нередко наблюдаются потери эффективности со временем из-за диффузии или десорбции активных компонентов.

Кроме того, привитые антипирены демонстрируют лучшую термоокислительную стабильность, поскольку образование низкомолекулярных летучих продуктов при термодеструкции существенно снижается. Такая устойчивость также способствует сохранению эстетических и механических свойств полимера, предотвращая поверхностное обесцвечивание, липкость и изменение текстуры.

Таким образом, привитые антипирены обеспечивают не только эффективную и устойчивую огнезащиту, но и повышают эксплуатационную надежность и экологическую безопасность полимерных материалов.

Механизмы огнезащитного действия

Огнезащитное действие привитых антипиренов реализуется через механизмы, характерные как для конденсированной, так и для газовой фаз [33, 34].

В конденсированной фазе привитые антипирены, особенно фосфорсодержащие (например, производные DOPO), способствуют формированию термостойкого углеродистого остатка, который играет роль защитного барьера, изолирующего подлежащий полимер от доступа кислорода и тепла. Это препятствует распространению пламени и снижает скорость термодеструкции. Кроме того, плотный слой кокса уменьшает испарение горючих продуктов, стабилизируя полимерную матрицу.

В газовой фазе антипиренные фрагменты могут высвобождать негорючие или разбавляющие газы (например, H_3PO_4 , H_2O , CO_2), которые понижают концентрацию кислорода и горючих радикалов в пламени. Некоторые привитые структуры способны ингибировать свободные радикалы, обра-

зующиеся в пламени, тем самым нарушая цепные реакции горения [33, 34].

В отличие от аддитивных антипиренов, привитые фрагменты более термически стабильны, не мигрируют и не выделяются из матрицы, обеспечивая длительный и локализованный эффект. Это снижает токсичность и дымообразование, а также повышает эффективность огнезащиты при меньшей концентрации антипиренного агента. Таким образом, привитые антипирены реализуют комбинированное барьерное и радикал-интерцепторное действие, превосходя традиционные системы по экологичности, стабильности и эксплуатационным характеристикам.

Области применения

Полимеры с привитыми антипиренами находят все более широкое применение благодаря способности обеспечивать длительную, эффективную и экологически безопасную защиту от горения. Одной из наиболее активно развивающихся областей являются древесно-полимерные композиты (ДПК), используемые в строительстве, мебельной промышленности и ландшафтном дизайне. В таких материалах ППА повышают термическую стабильность и снижают скорость распространения пламени без ущерба для механических свойств. Прививка антипиренов к полимерной матрице предотвращает их вымывание и обеспечивает устойчивость к воздействию влаги и ультрафиолетового излучения, что особенно важно для наружных конструкций [35–37].

В области электротехнических материалов и кабельных оболочек ППА применяются для модификации полиолефинов, ПВХ и термопластичных эластомеров, обеспечивая

огнезащиту, совместимую с требованиями стандартов по низкому дымо- и газовыделению. Благодаря ковалентному закреплению, такие антипирены не мигрируют и не ухудшают диэлектрические свойства материала, что критично для работы оборудования в условиях повышенной температуры и напряжения.

Крупнотоннажные полимеры, применяемые в строительстве, такие как ПВХ, ПЭ, ПП и полистирол, получают дополнительную огнестойкость при модификации ППА, что позволяет использовать их в напольных покрытиях, отделочных панелях, герметиках и кровельных материалах. ППА в этих системах позволяют отказаться от использования традиционных токсичных антипиренов, сохраняя при этом соответствие нормативам пожарной безопасности.

В текстильной промышленности волокна и ткани, модифицированные привитыми антипиренами, обладают стойкостью к многократным стиркам и трению без потери огнезащитных свойств. Это особенно важно для защитной одежды, мебели, штор и автомобильной обивки, где требуется стабильная и долговременная защита при эксплуатации.

Наконец, особое внимание уделяется применению ППА в биополимерах и биоразлагаемых материалах, таких как полилактид (ПЛА), полигидроксibuтират (ПГБ) и полибутиленсукцинат (ПБС). Эти полимеры, обладая хорошими экологическими характеристиками, страдают от низкой термической стабильности и высокой горючести. Прививка антипиренных групп позволяет существенно повысить их огнестойкость без ухудшения биоразлагаемости, что открывает перспективы их использования в упаковке, медицине и устойчивом строительстве.

В этом контексте ППА служат не только огнезащитной, но и функциональной платформой для создания безопасных и устойчивых полимерных решений в соответствии с принципами «зеленой» химии [19].

Экологические и токсикологические аспекты

Полимеры с привитыми антипиренами обладают рядом значительных преимуществ в контексте экологической безопасности и токсикологической приемлемости. Одним из ключевых факторов является снижение миграции антипиренов из полимерной матрицы. Благодаря ковалентному привязыванию антипиренного фрагмента к основной цепи полимера исключается его высвобождение в окружающую среду в процессе эксплуатации, что особенно актуально для изделий, контактирующих с человеком, водой и пищевыми продуктами. Кроме того, ППА позволяют контролировать состав и токсичность продуктов термодеструкции. В отличие от традиционных галогенсодержащих антипиренов, способных выделять при горении высокотоксичные соединения (например, диоксины, фураны, HCl), привитые фосфор-, азот- или кремнийорганические соединения обеспечивают менее опасные летучие продукты и снижают уровень дымообразования.

Проблемы и перспективы развития

Несмотря на очевидные преимущества полимеров с привитыми антипиренами (ППА), их широкое промышленное применение сопряжено с рядом существенных проблем. Одной из главных трудностей является трудоемкость и высокая стоимость синтеза таких

материалов, что связано с необходимостью проведения многоэтапных химических реакций и применения специализированных катализаторов или условий полимеризации. Это ограничивает доступность ППА для массового производства и повышает конечную стоимость продукции. Кроме того, совместимость привитых антипиренов с различными промышленными полимерами требует тщательного подбора реакционных условий и молекулярной архитектуры, чтобы избежать снижения механических и технологических характеристик материала [6].

Важной задачей для дальнейшего развития является масштабирование синтетических процессов, которое требует оптимизации реакторных систем и снижения экологического воздействия. Одновременно ведется разработка универсальных привитых антипиренов, способных эффективно работать в широком спектре полимерных матриц и обеспечивать стабильную огнезащиту при минимальной концентрации [6, 38].

С перспективной точки зрения, ППА играют важную роль в концепции экономики замкнутого цикла. Благодаря повышенной долговечности, снижению миграции токсичных веществ и возможности интеграции с биоразлагаемыми полимерами, ППА способствуют снижению экологического следа полимерных изделий и переходу к более ответственному потреблению ресурсов. В будущем развитие ППА может стать ключевым фактором в создании безопасных, эффективных и экологически совместимых полимерных материалов нового поколения.

Выводы

Полимеры с привитыми антипиренами представляют собой инновационную форму

огнезащиты, сочетающую высокую эффективность, стойкость к миграции и хорошую совместимость с полимерной матрицей. Привитые антипирены обеспечивают огнестойкость за счет ковалентного встраивания в структуру материала, что минимизирует их влияние на механические свойства и повышает долговечность композитов.

Обзор существующих методов синтеза (*grafting from, onto, through*) показал, что на сегодняшний день доступны разнообразные пути химической модификации полимеров с использованием фосфорорганических, азотсодержащих, кремний- и галогенсодержащих фрагментов. Такие системы демонстрируют как конденсированные, так и газофазные механизмы огнезащиты и позволяют значительно повысить термостойкость материалов.

Несмотря на высокую научную и практическую ценность ППА, их промышленное внедрение ограничивается рядом факторов: сложностью синтеза, высокой стоимостью прекурсоров и необходимостью адаптации под массово применяемые полимеры. Тем не менее активное развитие направлений «зеленой» химии, устойчивых полимеров и материалов с пониженной токсичностью создает благоприятные условия для дальнейшего прогресса в этой области.

Таким образом, полимеры с привитыми антипиренами представляют собой перспективный класс материалов нового поколения, способных удовлетворять требованиям безопасности, экологии и функциональности. Их разработка и масштабное применение открывают путь к созданию более устойчивых и безопасных полимерных систем для широкого круга применений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жирикова З. М., Алоев В. З., Тарчокова М. А. Огнестойкость полимерных материалов и способы ее повышения // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2019. № 3 (25). С. 43–48.
2. Огнестойкие полимеры / И. Ристич [и др.] // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2014. № 1. С. 7–15.
3. Troitzsch J. H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2024. Vol. 7. Iss. 3. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
4. Flame-retardant strategies for lignocellulose: recent progress and prospect / H. Liu et al. // Progress in Materials Science. 2026. Vol. 155. Art. 101529. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101529
5. Samani P., van der Meer Y. Life cycle assessment (LCA) studies on flame retardants: A systematic review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 274. Art. 123259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123259
6. A grafted flame-retardant gel polymer electrolyte stabilizing lithium metal for high-safety lithium metal batteries / C. Shaoshan et al. // J. Mater. Chem. A. 2024. Vol. 12. P. 28296–28306.
7. Editorial: Flame-Retardant Polymeric Materials and Polymer Composites / Y. Shi et al. // Frontiers in Materials. 2021. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.703123
8. Современные тенденции в разработке антипиренов для полимерных композиций. Состав, свойства, применение / Б. А. Буравов [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 12 (247). С. 7–24. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-12-247-7-24
9. Добавки для понижения горючести полимеров / И. И. Зарипов [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 2. С. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
10. Селиверстов В. В., Князев А. С. Антипирены для полимерных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 8. С. 42–47. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-8-42-47
11. Multiparameter toxicity assessment of novel DOPO-derived organophosphorus flame retardants / C. Hirsch et al. // Archives of Toxicology. 2017. Vol. 91. DOI: 10.1007/s00204-016-1680-4
12. Akinrinade O. E., Rosa A. H. A global review of PCBs and halogenated flame retardants in indoor air: Implication for human exposure risks // Chemosphere. 2025. Vol. 384. Art. 144495. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144495
13. Han A., Fina G., Camino G. Chapter 12 — Organosilicon Compounds as Polymer Fire Retardants // Polymer Green Flame Retardants / C. D. Papaspyrides, P. Kiliaris (Eds.). Elsevier, 2014. P. 389–418. DOI: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00012-3
14. A comprehensive review of reactive flame retardants for polyurethane materials: current development and future opportunities in an environmentally friendly direction / P. Parcheta-Szwindowska et al. // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25 (10). Art. 5512. DOI: 10.3390/ijms25105512
15. Курбанова М. А., Исмаилов И. И. Антипирены на основе борсодержащих кремнийорганических соединений // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. № 12. URL: <https://clck.su/ulTMV> (дата обращения: 22.02.2026).
16. Исследование влияния синергических систем антипиренов на огнетеплостойкость эластомерных композиций / В. Ф. Каблов и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 4 (159). С. 81–84.

17. Tsafack M. J., Levalois-Grützmacher J. Plasma-induced graft-polymerization of flame retardant monomers onto PAN fabrics // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 3503–3510. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.11.030
18. Micro-crosslinking of phosphaphenanthrene/siloxane molecule initiate aggregation flame retardant and toughening enhancement effects on its polycarbonate composite / W. Zhipeng et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 466. Art. 143169. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143169
19. Polymer grafting and its chemical reactions / P. Purohit et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Jan. DOI: 10.3389/fbioe.2022.1044927
20. Minko S. Grafting on solid surfaces: "Grafting to" and "Grafting from" methods // *Polymer Surfaces and Interfaces* / M. Stamm (Ed.). Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. P. 215–234. DOI: 10.1007/978-3-540-73865-7_11
21. Grafting from versus grafting to approaches for the functionalization of graphene nanoplatelets with poly(methyl methacrylate) / N. Rubio et al. // *Macromolecules*. 2017. Vol. 50. No. 18. P. 7070–7079. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01047
22. A novel click-chemistry approach to flame retardant polyurethanes / A. Borreguero et al. // *Reactive and Functional Polymers*. 2013. Vol. 73. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2013.06.003
23. Xu L., Wang W., Yu D. Preparation of a reactive flame retardant and its finishing on cotton fabrics based on click chemistry // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 2044–2050. DOI: 10.1039/C6RA26075F
24. Harnessing metal-free click chemistry: phosphorus and triazole synergy for improved flame retardant epoxy thermosets / I. Gunderen et al. // *Progress in Organic Coatings*. 2025. Vol. 207. Art. 109396. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109396
25. Synthesis of high-molecular-weight bifunctional additives with both flame retardant properties and antistatic properties via ATRP / S. Dong et al. // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. Iss. 48.
26. Hochół A., Flejszar M., Chmielarz P. Advances and opportunities in synthesis of flame retardant polymers via reversible deactivation radical polymerization // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 214. Art. 110414. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110414
27. Influence of monomer reactivity on radiation grafting of phosphorus flame retardants on flax fabrics / R. Hajj et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2019. Vol. 166. P. 86–98. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.025
28. Improving the flame retardancy of flax fabrics by radiation grafting of phosphorus compounds / R. Sonnier et al. // *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 68. P. 313–325.
29. Preparation of hexakis (4-aldehyde phenoxy) cyclotriphosphazene grafted kaolinite and its synergistic fire resistance in poly(butylene succinate) / S. Zhang et al. // *Polymer Composites*. 2020. Vol. 41. No. 3. P. 1024–1035.
30. Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: a review / X. H. Shi et al. // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 233. Art. 109663. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109663
31. Ezeh E., Udochukwu E. C., Aworabhi E. Applications of fire retardant polymer composites for improved safety in the industry: a review // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2024. Vol. 90. DOI: 10.1007/s43538-024-00333-7

32. Rubber-based phosphaphenanthrene grafted polymer and its application to fabricate flame retardant polycarbonate blend with satisfied comprehensive mechanical properties / A. Liu et al. // *Polymer*. 2024. Vol. 299. Art. 126969. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126969
33. Incorporation of a grafted brominated monomer in glass fiber reinforced polypropylene to improve the fire resistance / L. Ferry et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2001. Vol. 74. P. 449–456. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00182-3
34. The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering / J. Shen et al. // *Polymers (Basel)*. 2021. Vol. 14 (1). Art. 82. DOI: 10.3390/polym14010082
35. Design of compressible flame retardant grafted porous organic polymer based separator with high fire safety and good electrochemical properties / M. Xiaowei et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 405. Art. 126946. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126946
36. Flame-retardant self-healing polymers: a review / M. Kianfar et al. // *Journal of Polymer Science*. 2024. DOI: 10.1002/pol.20240489
37. Morgan A. B., Gilman J. W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions // *Fire and Materials*. 2013. Vol. 37. No. 4. DOI: 10.1002/fam.2128
38. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites / F. Laoutid et al. // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009. Vol. 63. P. 100–125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002

REFERENCES

1. Zhirikova Z. M., Alov V. Z., Tarchokova M. A. Fire resistance of polymeric materials and methods for its improvement // *Bulletin of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov*. 2019. No. 3 (25). P. 43–48.
2. Flame-resistant polymers / I. Ristic et al. // *Supervisory activities and forensic examination in the security system*. 2014. No. 1. P. 7–15.
3. Troitzsch J. H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2024. Vol. 7. Iss. 3. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.aiepr.2023.05.002
4. Flame-retardant strategies for lignocellulose: recent progress and prospect / H. Liu et al. // *Progress in Materials Science*. 2026. Vol. 155. Art. 101529. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101529
5. Samani P., van der Meer Y. Life cycle assessment (LCA) studies on flame retardants: A systematic review // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 274. Art. 123259. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123259
6. A grafted flame-retardant gel polymer electrolyte stabilizing lithium metal for high-safety lithium metal batteries / C. Shaoshan et al. // *J. Mater. Chem. A*. 2024. Vol. 12. P. 28296–28306.
7. Editorial: Flame-Retardant Polymeric Materials and Polymer Composites / Y. Shi et al. // *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.703123
8. Modern trends in the development of flame retardants for polymer compositions. Composition, properties, application / B. A. Buravov et al. // *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2020. No. 12 (247). P. 7–24. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-12-247-7-24

9. Additives for reducing the flammability of polymers / I. I. Zaripov et al. // *Nanotechnology in Construction: Scientific Online Journal*. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 156–161. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-2-156-161
10. Seliverstov V. V., Knyazev A. S. Flame retardants for polymeric materials // *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2023. No. 8. P. 42–47. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-8-42-47
11. Multiparameter toxicity assessment of novel DOPO-derived organophosphorus flame retardants / C. Hirsch et al. // *Archives of Toxicology*. 2017. Vol. 91. DOI: 10.1007/s00204-016-1680-4
12. Akinrinade O. E., Rosa A. H. A global review of PCBs and halogenated flame retardants in indoor air: Implication for human exposure risks // *Chemosphere*. 2025. Vol. 384. Art. 144495. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144495
13. Han A., Fina G., Camino G. Chapter 12 — Organosilicon Compounds as Polymer Fire Retardants // *Polymer Green Flame Retardants* / C. D. Papaspyrides, P. Kiliaris (Eds.). Elsevier, 2014. P. 389–418. DOI: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00012-3
14. A comprehensive review of reactive flame retardants for polyurethane materials: current development and future opportunities in an environmentally friendly direction / P. Parcheta-Szwindowska et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25 (10). Art. 5512. DOI: 10.3390/ijms25105512
15. Kurbanova M. A., Ismailov I. I. Flame retardants based on boron-containing organosilicon compounds // *Bulletin of Higher Education Institutions. Chemistry and Chemical Technology*. 2015. No. 12. URL: <https://clck.su/ulTMV> (accessed 22.02.2026).
16. Study of the influence of synergistic flame retardant systems on the fire and heat resistance of elastomer composites / V. F. Kablov et al. // *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2015. No. 4 (159). P. 81–84.
17. Tsafack M. J., Levalois-Grützmacher J. Plasma-induced graft-polymerization of flame retardant monomers onto PAN fabrics // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 3503–3510. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.11.030
18. Micro-crosslinking of phosphaphenanthrene/siloxane molecule initiate aggregation flame retardant and toughening enhancement effects on its polycarbonate composite / W. Zhipeng et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 466. Art. 143169. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143169
19. Polymer grafting and its chemical reactions / P. Purohit et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. Jan. DOI: 10.3389/fbioe.2022.1044927
20. Minko S. Grafting on solid surfaces: "Grafting to" and "Grafting from" methods // *Polymer Surfaces and Interfaces* / M. Stamm (Ed.). Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. P. 215–234. DOI: 10.1007/978-3-540-73865-7_11
21. Grafting from versus grafting to approaches for the functionalization of graphene nanoplatelets with poly(methyl methacrylate) / N. Rubio et al. // *Macromolecules*. 2017. Vol. 50. No. 18. P. 7070–7079. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01047
22. A novel click-chemistry approach to flame retardant polyurethanes / A. Borreguero et al. // *Reactive and Functional Polymers*. 2013. Vol. 73. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2013.06.003
23. Xu L., Wang W., Yu D. Preparation of a reactive flame retardant and its finishing on cotton fabrics based on click chemistry // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. P. 2044–2050. DOI: 10.1039/C6RA26075F

24. Harnessing metal-free click chemistry: phosphorus and triazole synergy for improved flame retardant epoxy thermosets / I. Gunderen et al. // *Progress in Organic Coatings*. 2025. Vol. 207. Art. 109396. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2025.109396
25. Synthesis of high-molecular-weight bifunctional additives with both flame retardant properties and antistatic properties via ATRP / S. Dong et al. // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7. Iss. 48.
26. Hochół A., Flejszar M., Chmielarz P. Advances and opportunities in synthesis of flame retardant polymers via reversible deactivation radical polymerization // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 214. Art. 110414. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110414
27. Influence of monomer reactivity on radiation grafting of phosphorus flame retardants on flax fabrics / R. Hajj et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2019. Vol. 166. P. 86–98. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.025
28. Improving the flame retardancy of flax fabrics by radiation grafting of phosphorus compounds / R. Sonnier et al. // *European Polymer Journal*. 2015. Vol. 68. P. 313–325.
29. Preparation of hexakis (4-aldehyde phenoxy) cyclotriphosphazene grafted kaolinite and its synergistic fire resistance in poly(butylene succinate) / S. Zhang et al. // *Polymer Composites*. 2020. Vol. 41. No. 3. P. 1024–1035.
30. Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: a review / X. H. Shi et al. // *Composites Part B: Engineering*. 2022. Vol. 233. Art. 109663. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109663
31. Ezeh E., Udochukwu E. C., Aworabhi E. Applications of fire retardant polymer composites for improved safety in the industry: a review // *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 2024. Vol. 90. DOI: 10.1007/s43538-024-00333-7
32. Rubber-based phosphaphenanthrene grafted polymer and its application to fabricate flame retardant polycarbonate blend with satisfied comprehensive mechanical properties / A. Liu et al. // *Polymer*. 2024. Vol. 299. Art. 126969. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126969
33. Incorporation of a grafted brominated monomer in glass fiber reinforced polypropylene to improve the fire resistance / L. Ferry et al. // *Polymer Degradation and Stability*. 2001. Vol. 74. P. 449–456. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00182-3
34. The flame-retardant mechanisms and preparation of polymer composites and their potential application in construction engineering / J. Shen et al. // *Polymers (Basel)*. 2021. Vol. 14 (1). Art. 82. DOI: 10.3390/polym14010082
35. Design of compressible flame retardant grafted porous organic polymer based separator with high fire safety and good electrochemical properties / M. Xiaowei et al. // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 405. Art. 126946. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126946
36. Flame-retardant self-healing polymers: a review / M. Kianfar et al. // *Journal of Polymer Science*. 2024. DOI: 10.1002/pol.20240489
37. Morgan A. B., Gilman J. W. An overview of flame retardancy of polymeric materials: application, technology, and future directions // *Fire and Materials*. 2013. Vol. 37. No. 4. DOI: 10.1002/fam.2128
38. New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites / F. Laoutid et al. // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009. Vol. 63. P. 100–125. DOI: 10.1016/j.mser.2008.09.002

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

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