

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 678.046:614.84

DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_11_37

А. Е. Шкуро, Т. В. Якубова, А. В. Артемов,
Г. А. Плюснин, Д. А. Хатыпов

**МЕХАНИЗМ ОГНЕЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И МИГРАЦИОННАЯ
СТАБИЛЬНОСТЬ 9,10-ДИГИДРО-9-ОКСА-10-ФОСФАФЕНАНТРЕН-10-ОКСИДА (DOPO)
И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ. ОБЗОР**

Ключевые слова: DOPO, фосфорсодержащие антипирены, огнезащитные материалы, экологическая безопасность, полимерные композиты, устойчивое развитие, пожарная безопасность.

Современная промышленность полимерных материалов сталкивается с растущими вызовами в области пожарной безопасности и экологической совместимости. Ужесточение международных нормативов и повышенное внимание к принципам «зеленой» химии и устойчивого развития обуславливают необходимость поиска и внедрения безопасных альтернатив традиционным галогенированным антипиренам. В данном контексте 9,10-дигидро-9-окса-10-фосфафенантрен-10-оксид (DOPO) и его производные представляют собой наиболее перспективный класс безгалогенных фосфорсодержащих антипиренов, отвечающих современным требованиям. Настоящая работа посвящена комплексному анализу механизмов огнезащитного действия, включая ингибирование в газовой фазе и образование коксового слоя в конденсированной, количественной оценке эффективности по параметрам конусной калориметрии и критической оценке миграционной стабильности этих соединений в различных полимерных матрицах, таких как эпоксидные смолы, полиэферы и полиамиды. Примененный системный подход включал всесторонний анализ научной литературы, сравнительную оценку экспериментальных данных, классификацию производных DOPO по структурным и функциональным признакам, а также критический анализ факторов, влияющих на миграционную стабильность. Результаты анализа убедительно подтверждают, что DOPO, особенно его реактивные производные, способны ковалентно встраиваться в полимерную цепь, представляют собой комплексное решение для создания высокоэффективных, долговечных и экологически безопасных огнезащитных материалов. Установлено, что именно реактивные производные демонстрируют превосходную миграционную стабильность, не склонны к выпотеванию и сохраняют огнезащитные свойства в течение всего жизненного цикла материала. В работе также определены перспективные направления дальнейших исследований, включая разработку новых производных с улучшенной совместимостью и синтез олигомерных форм для расширения области применения.

A. E. Shkuro, T. V. Yakubova, A. V. Artemov,
G. A. Plyusnin, D. A. Khatypov

**MECHANISM OF FIRE-RETARDANT ACTION, EFFICIENCY AND MIGRATION STABILITY
OF 9,10-DIHYDRO-9-OXA-10-PHOSPHAPHENANTHRENE-10-OXIDE (DOPO) AND ITS DERIVATIVES
IN POLYMERIC MATERIALS**

Keywords: DOPO, phosphorus-containing flame retardants, fire protection materials, environmental safety, polymer composites, sustainable development, fire safety.

The modern polymer industry faces growing challenges in the field of fire safety and environmental compatibility. Tightening international regulations and increased attention to the principles of "green" chemistry and sustainable development necessitate the search for and implementation of safe alternatives to traditional halogenated flame retardants. In this context, 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) and its derivatives are the most promising class of halogen-free phosphorus-containing flame retardants that meet modern requirements. This work is devoted to a comprehensive analysis of the mechanisms of flame retardant action, including inhibition in the gas phase and coke layer formation in the condensed phase, quantitative assessment of efficiency by cone calorimetry parameters and critical assessment of the migration stability of these compounds in various polymer matrices, such as epoxy resins, polyesters and polyamides. The applied systems approach included a comprehensive analysis of scientific literature, comparative evaluation of experimental data, classification of DOPO derivatives by structural and functional features, as well as a critical analysis of factors influencing migration stability. The results of the analysis convincingly confirm that DOPO, especially its reactive derivatives capable of covalently incorporating into the polymer chain, represent a comprehensive solution for creating highly effective, durable and environmentally friendly fire-retardant materials. It was found that it is the reactive derivatives that demonstrate excellent migration stability, are not prone to sweating and retain fire-retardant properties throughout the entire life cycle of the material. The work also identifies promising areas for further research, including the development of new derivatives with improved compatibility and the synthesis of oligomeric forms to expand the scope of application.

Введение

Вопрос обеспечения пожарной безопасности полимерных материалов остаётся одной из ключевых задач

современной химии и материаловедения. Широкое применение полимеров в строительстве, транспорте, электронике и бытовых изделиях сопровождается риском их

возгорания, что делает необходимым использование специальных добавок – антипиренов [1-6].

Традиционно наибольшее распространение получили галогенсодержащие антипирены (бром- и хлорорганические соединения). Они характеризовались высокой эффективностью, низкой себестоимостью и технологичностью применения [7, 8]. Однако исследования показали, что при горении и термическом разложении такие вещества выделяют токсичные и коррозионно-активные продукты (например, хлористый и бромистый водород, диоксины и фураны), что существенно ограничивает их дальнейшее использование [9-11]. В последние десятилетия на законодательном уровне в Европе, США и ряде других стран введены ограничения или запреты на применение целого ряда галогенсодержащих антипиренов [12, 13].

В этих условиях усилилось внимание к безгалогеновым системам, среди которых наиболее перспективными оказались соединения на основе фосфора. Их преимущества заключаются в высокой эффективности, возможности действия в конденсированной и газовой фазах, а также в большей экологической безопасности по сравнению с бромсодержащими аналогами [14-17]. Особенно активно изучается 9,10-дигидро-9-окса-10-фосфотрен-10-оксид – DOPO, предложенный ещё в 1980-х годах как универсальный фосфорорганический антипирен [18].

DOPO и его производные обладают уникальными свойствами: высокой термостабильностью, способностью к химическому встраиванию в полимерную матрицу и универсальностью применения. Они эффективны в отношении широкого круга полимеров – от термореактивных смол (эпоксидных, фенолоформальдегидных) до термопластов (полиамидов, поликарбоната, полиуретанов). Кроме того, комбинация DOPO с азотсодержащими или кремнийорганическими компонентами позволяет получать выраженный синергетический эффект, усиливающий огнезащиту [19-21].

Таким образом, актуальность изучения DOPO связана как с практической необходимостью создания эффективных и экологичных антипиренов, так и с научным интересом к фундаментальным механизмам их действия.

Синтез и свойства DOPO и его производных

DOPO представляет собой фосфорсодержащее гетероциклическое соединение с формулой $C_{12}H_9O_2P$ (рис. 1). Его структура включает фенантреновый фрагмент и атом фосфора, связанный с кислородным мостиком. Эта особенность обеспечивает сочетание высокой термической стабильности и реакционной способности [21, 22].

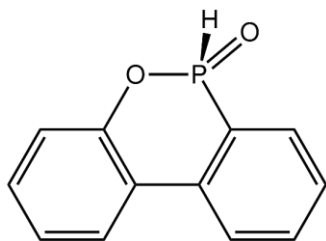


Рис. 1 – Структурная формула DOPO

Fig. 1 – Structural formula of DOPO

DOPO может быть получен термической конденсацией производных ортофенилфенола и PCl_3 в присутствии катализатора (рис. 2) [21].

Одним из наиболее распространённых промышленных методов получения DOPO является реакция 9,10-фенантренина с гипохлоритом под действием кислотных катализаторов.

Широкие возможности открываются при синтезе производных DOPO. Его активный P–H-фрагмент может вступать в реакции присоединения по двойным связям, а также взаимодействовать с эпоксидными, изоцианатными и акрилатными группами. Это позволяет создавать целые классы огнестойких соединений:

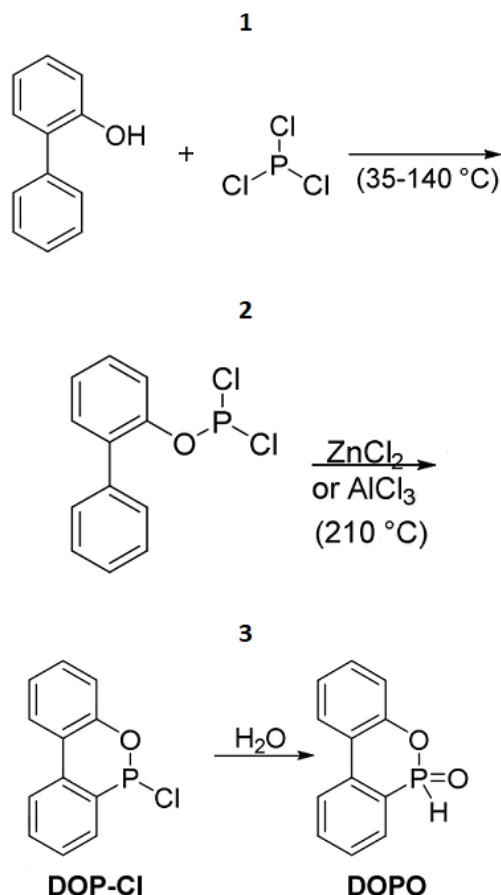


Рис. 2 – Схема синтеза DOPO

Fig. 2 – DOPO synthesis scheme

– эпоксидные производные – обеспечивают совместимость с эпоксидными смолами и возможность химического встраивания в их полимерную цепь [22-25];

– акрилатные производные – используются для сополимеризации с метакрилатами, что важно для создания прозрачных материалов [26];

– уретановые производные – применяются в составе полиуретанов для повышения их огнестойкости [27];

– аминные производные – обеспечивают дополнительную реакционную способность и возможность сочетания с эпоксидными системами [28].

Физико-химические свойства DOPO-производных антипиренов во многом определяются природой заместителей. Так, введение азотсодержащих групп повышает эффективность огнезащиты за счёт дополнительного выделения инертных газов при разложении, а сочетание с

кремнийорганическими фрагментами улучшает формирование углеродистого слоя [19, 20].

Кроме того, благодаря своей структуре DOPO способен существовать как в аддитивной форме (добавка в полимер), так и в реакционноспособной (ковалентно связывается с полимерной матрицей). Второй вариант особенно ценен, так как позволяет снизить миграцию антипирена из материала и повысить долговечность огнезащитного эффекта.

Механизмы огнезащитного действия DOPO

Эффективность DOPO и его производных определяется комплексным механизмом действия, который проявляется как в конденсированной фазе, так и в газовой. В конденсированной фазе основное значение имеет формирование защитного коксового слоя (чара), который препятствует доступу кислорода к полимерной матрице и замедляет выделение горючих продуктов пиролиза [20-22].

При нагревании DOPO разлагается с образованием фосфорных кислот, которые катализируют дегидратацию полимера. В результате формируются насыщенные и ароматические структуры, интегрирующиеся в коксовый слой. Фенантроновая структура DOPO повышает термическую стабильность получаемого слоя и улучшает его механические свойства, создавая эффективный барьер для теплопередачи и диффузии газов (рис. 3) [20-22].

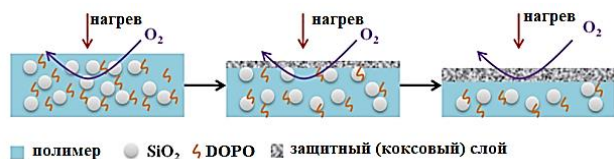


Рис. 3 – Механизм огнезащитного действия DOPO [25]

Fig. 3 – Mechanism of fire protection action of DOPO [25]

В газовой фазе DOPO действует за счёт генерации активных фосфорсодержащих радикалов ($\text{PO}\cdot$, $\text{HPO}\cdot$), которые взаимодействуют с $\text{H}\cdot$ и $\text{OH}\cdot$ радикалами пламени, прерывая цепные реакции горения. Параллельно выделяются негорючие газы (H_2O , CO_2), что снижает концентрацию горючих компонентов в зоне пламени. Кроме того, разложение DOPO является эндотермическим, что дополнительно охлаждает поверхность материала и замедляет процесс горения [29].

Особое значение имеет синергизм DOPO с другими добавками. Азотсодержащие соединения, такие как меламин, усиливают формирование пористой структуры коксового слоя и дополнительно участвуют в радикально-обрывных реакциях в газовой фазе. Кремнийорганические соединения образуют защитный SiO_2 -слой на поверхности коксового слоя, повышая его термическую стабильность [25]. Углеродные наноматериалы, такие как графен и углеродные нанотрубки, структурно укрепляют коксовый слой, создавая более плотный и механически прочный барьер [30]. Металлы и их соединения могут катализировать дегидратацию и перекрестное сшивание полимера, способствуя образованию более устойчивого коксового слоя [31].

Химическая структура производных DOPO определяет преобладание того или иного механизма. Производные с ароматическими заместителями преимущественно действуют в конденсированной фазе, образуя стабильный коксовый слой, тогда как алифатические производные более летучи и эффективны в газовой фазе. Олигомерные и полимерные производные обладают высокой миграционной стабильностью и действуют преимущественно в конденсированной фазе, минимально влияя на механические свойства полимера. Дополнительные гетероатомы (N, Si) обеспечивают синергетический эффект и улучшают совместимость с различными полимерными матрицами.

Оценка эффективности огнезащиты

Для количественной оценки эффективности DOPO используют стандартизованные методы: кислородный индекс (КИ), испытания по норме UL-94, конусную калориметрию и термогравиметрический анализ (ТГА).

Кислородный индекс характеризует минимальную концентрацию кислорода, необходимую для поддержания горения материала [32]. Для полимеров без антипиренов кислородный индекс обычно составляет 18–22 % (табл. 1), тогда как введение 10–20 мас. % DOPO повышает кислородный индекс до 28–38 %, переводя материалы в категорию трудногорючих или самозатухающих [18-21, 28, 29].

Таблица 1 – Кислородный индекс крупнотоннажных полимеров [28-31]

Table 1 – Oxygen index of large-tonnage polymers [28-31]

Полимер	Сокращение	КИ, %	Примечание
Полиэтилен	ПЭ	17-18	Легковоспламеняющийся
Полипропилен	ПП	17-18	Легковоспламеняющийся
Полистирол	ПС	18-19	Легковоспламеняющийся
Полиметилметакрилат	ПММА	17-18	Легковоспламеняющийся
Поливинилхлорид (гибкий)	ПВХ	24-28	Самозатухающий
Поливинилхлорид (жесткий)	ПВХ	40-45	Трудновоспламеняемый, самозатухающий
Полиэтилентерефталат	ПЭТ	20-22	Умеренная горючесть
Полиамид 6	ПА6	21-23	Умеренная горючесть
Полиамид 66	ПА66	21-23	Умеренная горючесть
Поликарбонат	ПК	22-25	Самозатухающий при толщине >2 мм
Политетрафторэтилен	ПТФЭ	>95	Не горит, высочайший КИ

Испытания по стандарту UL-94 позволяют классифицировать материалы по способности к самозатуханию в вертикальной и горизонтальной конфигурациях. DOPO-модифицированные эпоксидные и полиуретан-

новые системы часто достигают рейтинга V-0, что делает их пригодными для электроники и кабельной продукции [33, 34].

Конусная калориметрия предоставляет наиболее полную информацию о пожарной опасности: измеряются пиковая скорость тепловыделения (ПСТВ), общее тепловыделение (ОТВ), время до воспламенения (ВВ) и дымообразование. Применение DOPO снижает ПСТВ на 40–75%, увеличивает ВВ и снижает дымообразующую способность, что отражает высокую эффективность как конденсированной, так и газовой фаз [35, 36].

Эффективность антипиренов на основе DOPO в значительной степени зависит от химической природы полимерной матрицы, что обусловлено различиями в механизмах термического разложения полимеров и химической совместимости с антипиреном (табл. 2). Уникальная структура DOPO позволяет ему проявлять активность как в конденсированной, так и в газовой фазе, однако преобладание того или иного механизма и, как следствие, конечная огнезащитная эффективность тесно связаны со спецификой модифицируемого полимера.

Эпоксидные смолы являются одной из наиболее благодатных и глубоко изученных матриц для применения DOPO [22–25]. Полярная природа и наличие реакционноспособных групп в эпоксидных системах создают идеальные условия для использования реактивных производных DOPO. Такие производные, например, DOPO-содержащие отвердители или модифицированные эпоксидные олигомеры, способны ковалентно встраиваться в трехмерную сетку полимера в процессе отверждения. Это обеспечивает не только превосходную миграционную стабильность и долговечность огнезащиты, но и равномерное распределение антипирена по объему материала. При относительно низком содержании фосфора в 2–5% такие композиции достигают высшего рейтинга UL-94 V-0, а их кислородный индекс возрастает с исходных 19–22% до 28–35%. Комплексный механизм действия, включающий ингибирование радикальных процессов в пламени и каталитическое образование прочного коксового слоя на поверхности, приводит к значительному снижению пиковой скорости тепловыделения (на 40–60%) при испытании в конусном калориметре.

Полиэфирсы, такие как полибутилентерефталат (ПБТ) и полиэтилентерефталат (ПЭТФ), также высоко восприимчивы к модификации DOPO [37]. Эти полимеры склонны к пиролизическому расщеплению эфирных связей, и производные DOPO эффективно воздействуют на этот процесс в конденсированной фазе. Наибольшее распространение получили реактивные производные, способные к сополимеризации, например, DOPO-HQ (производное гидрохинона) или DOPO-ITA (производное итаконовой кислоты). Их введение в количестве 10–15% от массы полимера (что эквивалентно примерно 2% фосфора) позволяет достичь класса V-0 по UL-94. При этом кислородный индекс повышается до значений 28–32%. Ключевым фактором эффективности является способность DOPO катализировать переэтерификацию и структурирование полимера при нагревании, приводя к формированию стабильного углеродного остатка (чара), который замедляет дальнейшее разложение и препятствует доступу кислорода.

Полиамиды (ПА-6, ПА-66) представляют особый интерес благодаря наличию в своей структуре азота, который может проявлять синергетический эффект с фосфором. В данной матрице наиболее эффективными оказываются не мономерные формы DOPO, а его соли фосфинатов (например, коммерческий продукт Levagard 6000 от Lanxess) и олигомерные производные. Для достижения стойкого самозатухания (V-0) в тонкостенных изделиях из полиамида 6 требуется сравнительно высокая нагрузка антипирена – 15–20% масс., что обеспечивает содержание фосфора около 2,5%. Доминирующим механизмом огнезащиты в этом случае является ингибирование в газовой фазе: при термическом разложении выделяются активные радикалы $PO\cdot$ и $HPO\cdot$, которые эффективно обрывают цепные реакции горения. Благодаря синергии с азотом полиамидной матрицы кислородный индекс таких композиций может достигать впечатляющих значений 30–36% [37–40].

Полиуретаны, особенно жесткие и гибкие пены, широко используемые в строительстве и мебельной промышленности, модифицируются, как правило, с помощью DOPO-содержащих полиолов. Эти производные химически входят в состав полимерной цепи в процессе синтеза полиуретана. Основной механизм огнезащиты здесь реализуется в конденсированной фазе. DOPO способствует интенсивному образованию вспененного, многократно увеличенного в объеме коксового слоя при горении. Этот слой действует как термо- и массообменный барьер, препятствуя проникновению тепла к материалу и выходу летучих продуктов пиролиза. Введение 10–20% масс. такого полиола позволяет материалам успешно проходить строгие испытания на воспламеняемость (например, BS 5852) и соответствовать строительным нормам (например, DIN 4102). Важным преимуществом является значительное снижение дымообразования и токсичности продуктов горения по сравнению с галогенированными антипиренами [22, 24].

Полиолефины (полипропилен, полиэтилен) являются наиболее сложными для огнезащиты с помощью DOPO из-за их неполярной природы и гидрофобности, что приводит к плохой совместимости, а также механизма термического разложения, который не способствует самостоятельному образованию коксового слоя. Самостоятельная эффективность DOPO в полипропилене крайне низка, и для достижения даже скромных показателей (например, UL-94 V-2) требуются высокие нагрузки в 20–30% масс., что неприемлемо из-за резкого ухудшения механических свойств. Поэтому в полиолефинах DOPO применяется почти исключительно в качестве ключевого фосфорсодержащего компонента в составе сложных интумесцентных систем [41–43]. В комбинации с синергистами, такими как меламин (и его производные, например, меламинцианат) и пентаэритрит (как углеродистый компонент), DOPO способствует формированию на поверхности полимера при горении вспененного многократно теплоизолирующего слоя. Такие системы позволяют поднять кислородный индекс полипропилена с исходных 17–18% до 25–28%, однако достижение высшего класса V-0 остается сложной научно-технической задачей и требует тонкой оптимизации всего рецептурного комплекса [41, 43].

В исследовании [44] рассматривается огнезащитное покрытие для бумаги на основе производного DOPO, синтезированного реакцией с 3-аминфенилсульфоном и бензальдегидом. Покрытие на основе UV-отверждаемых акрилатов (TMPTA, HEMA, PEGDA) с добавкой 1%, 3% и 5% DOPO наносилось на бумагу. Результаты показали значительное повышение огнестойкости: предел кислородного индекса (LOI) вырос на 30,2% для образца с 5% DOPO, что делает бумагу гораздо трудновоспламеняемой. Термогравиметрический анализ подтвердил улучшение термической стабильности покрытой бумаги. При этом добавление DOPO привело к повышению гидрофильности поверхности (снижение контактного угла смачивания с 82° до 19,4°) и незначительному снижению глянца из-за увеличения шероховатости. Таким образом, производное DOPO доказало свою эффективность как безгалогенный антипирен, обеспечивающий бумаге повышенную защиту от возгорания.

Таблица 2 – Эффективность антипиренов на основе DOPO в различных полимерных матрицах

Table 2 – Efficiency of DOPO-based flame retardants in various polymer matrices

Полимерная матрица	Рекомендуемый тип DOPO-производного	Содержание масс. %	Достижимый КИ, %	Механизм действия
Эпоксидные смолы	Реактивные (отвердители, модиф. смолы)	5-15%	28-35	Конденсированная + газовая фаза
ПБТ/ПЭТ	Реактивные	10-15%	28-32	Конденсированная фаза
Полиамиды (ПА6)	Соли фосфинатов, олигомеры	15-20%	30-36	Газовая фаза
Полиуретаны	DOPO-полиолы	10-20%	25-30	Конденсированная фаза
Полипропилен	Аддитивные + синергисты (меламин, карбамид)	20-30% (в составе системы)	25-28	Интумесцентный (конденсир.)

Различия между реактивными и аддитивными производными DOPO также существенны [45, 46]. Реактивные формы обладают минимальной миграцией, равномерным распределением в объеме материала и меньшим влиянием на механические свойства. Аддитивные формы проще в использовании, но могут мигрировать и оказывать пластифицирующее действие.

Миграционная стабильность антипиренов на основе DOPO

Миграционная стабильность является ключевым параметром для долговременной эффективности огнезащитных систем. Миграция антипиренов из полимерной матрицы может приводить к снижению огнезащитных свойств и создавать экологические риски при выщелачивании в окружающую среду.

Миграция определяется термодинамическим потенциалом антипирена в матрице и окружающей среде. Высокая совместимость с полимером, крупная молекулярная масса и ковалентная связь с полимерной цепью уменьшают стимул для миграции. Напротив, низкомолекулярные и аддитивные формы имеют высокую подвижность и склонны к вымыванию [46].

Кинетически скорость миграции зависит от коэффициента диффузии, который определяется размером и формой молекулы, гибкостью полимерных цепей, температурой и наличием пластификаторов. Механизмы миграции включают диффузию через объем полимера, перемещение по поверхности и вымывание при контакте с жидкостями.

Методы исследования миграционной стабильности включают ускоренное старение при повышенных температурах, испытания на выщелачивание, спектроскопические методы (ИК-спектроскопия, рамановская и рентгеновская спектроскопия), микроскопические исследования (сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия) и анализ летучих продуктов (газовая хроматография-масс-спектрометрия, термогравиметрический анализ). Эти методы позволяют количественно оценить изменения свойств материала и определить степень миграции антипирена [47].

Для повышения миграционной стабильности антипиренов применяют ряд стратегий, наиболее эффективной из которых является ковалентное связывание молекул DOPO с полимерной матрицей. Этот подход реализуется через использование реакционноспособных производных DOPO, специально разработанных для разных типов полимеров: модифицированные отвердители для эпоксидных смол, DOPO-содержащие полиолы для полиуретанов, функционализированные мономеры для полиолефинов. Долговременную стабильность также повышают за счет применения олигомерных и полимерных форм антипиренов, снижающих подвижность молекул. Дополнительный эффект достигается улучшением совместимости с матрицей, инкапсуляцией антипирена и созданием синергетических систем с нанонаполнителями или сорбционными добавками [45].

Различия в миграционной стабильности между аддитивной и реактивной формами DOPO, приведены в многочисленных исследованиях [27, 45, 48]. Например, в эпоксидных смолах аддитивный DOPO может терять до 70-90% своей массы после 24 часов выщелачивания в горячей воде (70-80°C), что приводит к снижению предельного кислородного индекса с 29% до значений, близких к не модифицированному полимеру (~23-24%). В отличие от этого, эпоксидные смолы, сшитые с реакционноспособным производным DOPO (например, DOPO-содержащим отвердителем), показывают потерю массы после аналогичных испытаний менее 5-10%, а их кислородный индекс остается практически неизменным (28-29%) даже после длительного старения. Аналогичная тенденция наблюдается в полиуретанах: выщелачивание аддитивного DOPO из полиуретановой пены может достигать 60% за 48 часов, в то время как DOPO-содержащие полиолы, встроенные в полимерную цепь, демонстрируют миграцию менее 10%. Эти данные наглядно подтверждают, что переход от аддитивной к реактивной форме является наиболее эффективным путем решения проблемы миграции.

Практическое применение и промышленные аспекты

Современный рынок экологичных фосфорсодержащих антипиренов концентрируется вокруг ограниченного круга международных лидеров, определяющих основные направления развития этой высокотехнологичной отрасли. Ключевыми игроками выступают Clariant (Швейцария) с инновационными разработками серий Exolit® OP и AP, Lanxess (Германия) с комплексными решениями Levagard® и Disflamoll®, а также Italmatch Chemicals (Италия) с продукцией линейки Phoslite®. Наряду с ними значимое влияние на рынок оказывают Albemarle (США) в сегменте фосфорорганических составов и японская ADEKA, чьи реакционноспособные производные DOPO находят применение в эпоксидных системах. Особую роль в азиатском регионе играет Shandong Brother Technology (Китай), дополняемый специализированными производителями – Sanko, Metadynea Austria GmbH, Jiangyin Hanfeng, GYC Group, Weidong Chemical и Jiangsu H&G, которые обеспечивают гибкость поставок и технологическое разнообразие. Сформировавшаяся отраслевая структура наглядно демонстрирует глобальную переориентацию на устойчивые огнезащитные технологии, где крупные корпорации задают стратегические направления, а более узкоспециализированные компании поддерживают инновационную динамику рынка.

Производные DOPO находят применение во множестве отраслей благодаря сочетанию высокой огнезащитной эффективности и экологической безопасности. В электронике и электротехнике DOPO используется в огнезащитных эпоксидных смолах для печатных плат, в компаундах для инкапсуляции электронных компонентов и в кабельной изоляции [49, 50]

В транспортной отрасли DOPO применяется для обработки автомобильных интерьеров, авиационных и железнодорожных композитов, улучшая пожаробезопасность материалов. В строительстве используются полиуретановые и полиизоциануратные пены, полиэфирные композиты для панелей и огнезащитные покрытия, что обеспечивает комплексную защиту конструкций [45, 49, 50].

В текстильной промышленности DOPO применяют для огнезащитной обработки тканей, мебели, ковровых покрытий и матрасов [51].

Технологические аспекты введения антипиренов включают методы сухого и растворного смешения для аддитивных форм, а также химическую модификацию полимеров или мономеров для реактивных форм. Влияние на технологические свойства полимеров, такие как вязкость, температура обработки и время отверждения, требует оптимизации процессов для обеспечения равномерной дисперсии и минимизации миграции. Оптимизация состава также включает баланс между эффективностью огнезащиты и механическими, термическими и электрическими свойствами материала, а также использование синергетических систем с другими добавками [45].

Экономическая привлекательность DOPO обусловлена доступностью сырья, отработанной технологией производства, высоким выходом продукции и легкой масштабируемостью. Высокая эффективность позво-

ляет снижать расход антипирена, что уменьшает затраты и поддерживает технологическую простоту переработки. Реактивные формы DOPO обеспечивают долговечность материалов, снижая эксплуатационные и экологические расходы. Растущий спрос обусловлен ужесточением экологических и пожарных нормативов, а широкие возможности применения делают DOPO конкурентоспособным на мировом рынке.

Заключение

DOPO и его производные представляют собой перспективный класс безгалогенных фосфорсодержащих антипиренов, демонстрирующих комплексное действие в конденсированной и газовой фазе. Уникальная структура с фенантреновым фрагментом и активным Р-Н центром обеспечивает высокую эффективность огнезащиты при относительно низких концентрациях.

Реактивные формы DOPO характеризуются минимальной миграцией и долговременной стабильностью, что делает их особенно полезными для материалов длительного использования. Возможность модификации и синтеза олигомерных и полимерных форм расширяет диапазон применения и позволяет адаптировать антипирены под конкретные полимерные матрицы.

Основные преимущества DOPO включают экологическую безопасность, высокую эффективность при низких концентрациях, отсутствие токсичных продуктов горения, отличную совместимость с различными полимерами и возможность создания синергетических систем с нанонаполнителями и другими добавками.

Перспективы развития DOPO и его производных включают: создание новых антипиренов с управляемыми свойствами, углубленное изучение долговечности и миграционной стабильности, разработку синергетических композиций с наноматериалами, комплексные токсикологические исследования, промышленное масштабирование процессов производства и расширение областей применения, включая высокотемпературные полимеры и биополимеры. Многофункциональные системы, совмещающие огнезащиту с антимикробными, самозаживляющимися или сенсорными функциями, представляют собой перспективное направление научных исследований.

Таким образом, DOPO является перспективной основой для создания экологически безопасных, высокоэффективных и долговечных огнезащитных материалов, соответствующих современным требованиям устойчивого развития и техносферной безопасности.

Литература

1. В.А. Ушков, А.М. Орлова, А.М. Славин, В.А. Тарасов, *Пром. и гражд. стр-во*, 9, 40-42 (2011).
2. С.М. Ломакин, Г.Е. Заиков, А.К. Микитаев, *Вестн. Казан. технол. ун-та*, 15, 7, 71-86 (2012).
3. А.Н. Егоров, Е.В. Криволапова, *В мире науч. откр.*, 2-1(62), 654-659 (2015).
4. Д.Л. Подобед, С.Н. Бобрышева, С.В. Потапенко, *Горная мех. и машиностр.*, 4, 44-53 (2016).
5. M. Bar, A. Ramasamy, A. Das, *Fibres Polym.*, 16, 705-717 (2014). DOI: 10.1007/s12221-015-0705-6.
6. B.W. Liu, H.B. Zhao, Y.Z. Wang, *Adv. Mater.*, 34, 46, e2107905 (2022). DOI: 10.1002/adma.202107905.
7. Khandual, *Colourage*, 61, 29 (2014).
8. M. Alae, P. Arias, A. Sjodin, A. Bergman, *Environ. Int.*, 29, 683-689 (2003). DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00121-1.

9. S.D. Shaw, A. Blum, R. Weber, K. Kannan, D. Rich, D. Lucas, C.P. Koshland, D. Dobraca, S. Hanson, L.S. Birnbaum, *Rev. Environ. Health*, **25**, 4, 261-305 (2010). DOI: 10.1515/rev.2010.25.4.261.
10. S.L. Waaijers, D. Kong, H.S. Hendriks, C.A. de Wit, I.T. Cousins, R.H. Westerink, P.E. Leonards, M.H. Kraak, W. Admiraal, P. de Voogt, J.R. Parsons, *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, **222**, 1-71 (2013). DOI: 10.1007/978-1-4614-4717-7.
11. T.C.R. Rialto, R.V. Marino, F.R. Abe, D.J. Dorta, D.P. Oliveira, *Toxics*, **11**, 9, Article 732 (2023). DOI: 10.3390/toxics11090732.
12. J. Boer, S. Harrad, M. Sharkey, *Chemosphere*, **347**, Article 140638 (2023). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140638.
13. G. Martinez, J. Niu, L. Takser, J.-Ph. Bellenger, J. Zhu, *Environ. Pollut.*, **285**, Article 117476 (2021). DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117476.
14. L. Gu, Z. Ge, M.-H. Huang, Y. Luo, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**, Article 41288 (2015). DOI: 10.1002/app.41288.
15. Z. Yin, Z. Jiang, T. Wu, *Front. Mater.*, **12**, Article 1508000 (2025). DOI: 10.3389/fmats.2025.1508000.
16. M. Chen, Q. Guo, Y. Yuan, A. Li, B. Lin, Y. Xiao, L. Xu, W. Wang, *Polymers*, **17**, 249 (2025). DOI: 10.3390/polym17020249.
17. Y. Luo, Z. Geng, W. Zhang, J. He, R. Yang, *Polymers*, **15**, 3711 (2023). DOI: 10.3390/polym15183711.
18. C.-D. Varganici, L. Rosu, A. Bifulco, D. Rosu, F. Mustata, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **202**, Article 110020 (2022). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2022.110020.
19. Bifulco, C.-D. Varganici, L. Rosu, F. Mustata, D. Rosu, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **202**, Article 109999 (2022). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2022.109999.
20. C.T. Duc, L.C. Nguyen, P.B. Van, H.T. Nguyen, T.A. Dang Thi, G. Le-Nhat-Thuy, Q.G. Nguyen Thi, P.H. Thi, T.A. Nguyen, Q.V. Tran, H.T. Quang, M.H. Hoang, T.N. Van, *RSC Adv.*, **14**, 8, 5264-5275 (2024). DOI: 10.1039/d4ra00051j.
21. S. Dong, Y. Wang, L. Liu, H. Jia, Y. Zang, L. Zu, T. Lan, J. Wang, *ACS Omega*, **51**, 8, 48825-48842 (2023). DOI: 10.1021/acsomega.3c06235.
22. Z. Chi, Z. Guo, Z. Xu, M. Zhang, M. Li, L. Shang, Y. Ao, *Polym. Degrad. Stab.*, **176**, Article 109151 (2020). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2020.109151.
23. Y. Luo, Y. Lan, J. Cai, Q. Jiang, X. Wang, H. Zhang, L. Hou, L. Xiao, *Eur. Polym. J.*, **222**, Article 113605 (2024). DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113605.
24. P. Li, J. Wang, C. Wang, C. Xu, A. Ni, *Polymers*, **16**, Article 631 (2024). DOI: 10.3390/polym16050631.
25. G.C. Reddy, X. Wang, Y. Kan, L. Song, Y. Hu, *Polym. Int.*, **68**, Article 5784 (2019). DOI: 10.1002/pi.5784.
26. F. Bier, J.-L. Six, A. Durand, *Macromol. Mater. Eng.*, **304**, Article 1800645 (2019). DOI: 10.1002/mame.201800645.
27. H. Wang, S. Wang, X. Du, H. Wang, X. Cheng, Z. Du, *RSC Adv.*, **9**, 7411-7419 (2019). DOI: 10.1039/C8RA09838G.
28. K. Andrianova, L.M. Amirova, A. Gaifutdinov, V. Miluykov, A. Zagidullin, R.R. Amirov, *Results Eng.*, **14**, Article 100421 (2022). DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100421.
29. W. Liu, X. Chen, Y. Zhang, Y. Huang, S. Liu, A. Zhang, S. Huang, *Polym. Degrad. Stab.*, **242**, Article 111681 (2025). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2025.111681.
30. W. Yang, Z. Wang, X. Zhu, Y. Zhang, Y. Luo, X. Wang, *Polymer*, **306**, Article 127210 (2024). DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127210.
31. Y. Hou, L. Liu, S. Qiu, X. Zhou, Z. Gui, Y. Hu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, Article 7b19395 (2018). DOI: 10.1021/acsami.7b19395.
32. R. Lyon, M. Zarzecki, M.R. Fullmer, R. Walters, S. Crowley, *Proc. 21st Annu. Conf. Recent Adv. Flame Retard. Polym. Mater.*, 405-417 (2010).
33. S. Hong, J. Yang, S. Ahn, Y. Mun, G. Lee, *Fire Mater.*, **28**, 25-31 (2004). DOI: 10.1002/fam.840.
34. R. Crossley, P. Schubel, A. Stevenson, *J. Reinfr. Plast. Compos.*, **33**, 58-68 (2013). DOI: 10.1177/0731684413502108.
35. B. Shi, C. Yang, H. Long, *Fire*, **6**, 11, Article 431 (2023). DOI: 10.3390/fire6110431.
36. Szczotok, D. Madsen, A. Serrano, M. Carmona, P. Van Hees, J. Rodríguez, A.-L. Kjøniksen, *J. Mater. Sci.*, **56**, 1-17 (2021). DOI: 10.1007/s10853-020-05389-6.
37. O. Fischer, D. Pospiech, A. Korwitz, K. Sahre, L. Häußler, P. Friedel, D. Fischer, C. Hamisch, Y. Bykov, M. Döring, *Polym. Degrad. Stab.*, **96**, 12, 2198-2208 (2011). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2011.09.006.
38. B. Liang, K. Liu, J. Dai, W. Chen, W. Lu, *Polym. Degrad. Stab.*, **225**, Article 110807 (2024). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2024.110807.
39. C.K. Kundu, B. Yu, C.S.R. Gangireddy, X. Mu, B. Wang, X. Wang, L. Song, Y. Hu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**, 6, 1376-1384 (2017). DOI: 10.1021/acs.iecr.6b04188.
40. K. Liu, Y. Li, L. Tao, R. Xiao, *RSC Adv.*, **17**, 8, 9261-9271 (2018). DOI: 10.1039/C7RA13228J.
41. F. Seidi, E. Movahedifar, G. Naderi, et al., *Polymers*, **12**, 8, Article 1701 (2020). DOI: 10.3390/polym12081701.
42. W. Huang, K. Wang, C. Tu, X. Xu, Q. Tian, C. Ma, Q. Fu, Y. Yan, *Polymers*, **14**, Article 2372 (2022). DOI: 10.3390/polym14122372.
43. R. Chen, K. Hu, H. Tang, J. Wang, F. Zhu, H. Zhou, *Polym. Degrad. Stab.*, **166**, 334-343 (2019). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2019.06.011.
44. H. Birtane, *Grid Conf. Proc.*, 169-175 (2020). DOI: 10.24867/GRID-2020-p16.
45. K.A. Salmeia, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **113**, 119-134 (2015). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2014.12.014.
46. G. Marosi, B. Szolnoki, K.B. Bocz, A. Toldy, in *Reactive and Additive Phosphorus-Based Flame Retardants of Reduced Environmental Impact*, Elsevier, Amsterdam, 2014. DOI: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00005-6.
47. D. Kockott, *Polym. Test.*, **110**, Article 107550 (2022). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107550.
48. L. Cai, F. Xin, C. Zhai, Y. Chen, B. Xu, X. Li, *RSC Adv.*, **11**, 12, 6781-6790 (2021). DOI: 10.1039/d0ra08982f.
49. M. Ou, R. Lian, R. Li, J. Cui, H. Guan, J. Zhu, L. Liu, C. Jiao, C. Xilei, *Macromol. Rapid Commun.*, **44**, Article e2300262 (2023). DOI: 10.1002/marc.202300262.
50. Buczek, T. Stelzig, L. Bommer, D. Rentsch, M. Heneczkowski, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **107**, 158-165 (2014). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2014.05.017.
51. S. Chernyy, S. Ulah, G. Sørensen, S. Tordrup, P. Pedersen, K. Almdal, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**, Article 41955 (2015). DOI: 10.1002/app.41955.

References

1. V.A. Ushkov, A.M. Orlova, A.M. Slavin, V.A. Tarasov, *Industrial and Civil Construction*, **9**, 40-42 (2011).
2. S.M. Lomakin, G.E. Zaikov, A.K. Mikitaev, *Herald of Kazan Technological University*, **15**, 7, 71-86 (2012).
3. A.N. Egorov, E.V. Krivolapova, *In the World of Scientific Discovery*, 2-1 (62), 654-659 (2015).
4. D.L. Podobed, S.N. Bobrysheva, S.V. Potapenko, *Mining Mechanics and Machine Building*, **4**, 44-53 (2016).
5. M. Bar, A. Ramasamy, A. Das, *Fibres Polym.*, **16**, 705-717 (2014). DOI: 10.1007/s12221-015-0705-6.
6. B.W. Liu, H.B. Zhao, Y.Z. Wang, *Adv. Mater.*, **34**, 46, e2107905 (2022). DOI: 10.1002/adma.202107905.
7. Khandual, *Colourage*, **61**, 29 (2014).
8. M. Alaei, P. Arias, A. Sjödin, Å. Bergman, *Environ. Int.*, **29**, 683-689 (2003). DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00121-1.
9. S.D. Shaw, A. Blum, R. Weber, K. Kannan, D. Rich, D. Lucas, C.P. Koshland, D. Dobraca, S. Hanson, L.S. Birnbaum, *Rev. Environ. Health*, **25**, 4, 261-305 (2010). DOI: 10.1515/rev.2010.25.4.261.
10. S.L. Waaijers, D. Kong, H.S. Hendriks, C.A. de Wit, I.T. Cousins, R.H. Westerink, P.E. Leonards, M.H. Kraak, W. Admiraal, P. de Voogt, J.R. Parsons, *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, **222**, 1-71 (2013). DOI: 10.1007/978-1-4614-4717-7.
11. T.C.R. Rialto, R.V. Marino, F.R. Abe, D.J. Dorta, D.P. Oliveira, *Toxics*, **11**, 9, Article 732 (2023). DOI: 10.3390/toxics11090732.
12. J. Boer, S. Harrad, M. Sharkey, *Chemosphere*, **347**, Article 140638 (2023). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140638.
13. G. Martinez, J. Niu, L. Takser, J.-Ph. Bellenger, J. Zhu, *Environ. Pollut.*, **285**, Article 117476 (2021). DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117476.
14. L. Gu, Z. Ge, M.-H. Huang, Y. Luo, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**, Article 41288 (2015). DOI: 10.1002/app.41288.
15. Z. Yin, Z. Jiang, T. Wu, *Front. Mater.*, **12**, Article 1508000 (2025). DOI: 10.3389/fmats.2025.1508000.
16. M. Chen, Q. Guo, Y. Yuan, A. Li, B. Lin, Y. Xiao, L. Xu, W. Wang, *Polymers*, **17**, 249 (2025). DOI: 10.3390/polym17020249.
17. Y. Luo, Z. Geng, W. Zhang, J. He, R. Yang, *Polymers*, **15**, 3711 (2023). DOI: 10.3390/polym15183711.
18. C.-D. Varganici, L. Rosu, A. Bifulco, D. Rosu, F. Mustata, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **202**, Article 110020 (2022). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2022.110020.
19. Bifulco, C.-D. Varganici, L. Rosu, F. Mustata, D. Rosu, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **202**, Article 109999 (2022). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2022.109999.
20. C.T. Duc, L.C. Nguyen, P.B. Van, H.T. Nguyen, T.A. Dang Thi, G. Le-Nhat-Thuy, Q.G. Nguyen Thi, P.H. Thi, T.A. Nguyen, Q.V. Tran, H.T. Quang, M.H. Hoang, T.N. Van, *RSC Adv.*, **14**, 8, 5264-5275 (2024). DOI: 10.1039/d4ra00051j.
21. S. Dong, Y. Wang, L. Liu, H. Jia, Y. Zang, L. Zu, T. Lan, J. Wang, *ACS Omega*, **51**, 8, 48825-48842 (2023). DOI: 10.1021/acsomega.3c06235.
22. Z. Chi, Z. Guo, Z. Xu, M. Zhang, M. Li, L. Shang, Y. Ao, *Polym. Degrad. Stab.*, **176**, Article 109151 (2020). DOI: 10.1016/j.polyimdeggradstab.2020.109151.

23. Y. Luo, Y. Lan, J. Cai, Q. Jiang, X. Wang, H. Zhang, L. Hou, L. Xiao, *Eur. Polym. J.*, **222**, Article 113605 (2024). DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113605.
24. P. Li, J. Wang, C. Wang, C. Xu, A. Ni, *Polymers*, **16**, Article 631 (2024). DOI: 10.3390/polym16050631.
25. G.C. Reddy, X. Wang, Y. Kan, L. Song, Y. Hu, *Polym. Int.*, **68**, Article 5784 (2019). DOI: 10.1002/pi.5784.
26. F. Bier, J.-L. Six, A. Durand, *Macromol. Mater. Eng.*, **304**, Article 1800645 (2019). DOI: 10.1002/mame.201800645.
27. H. Wang, S. Wang, X. Du, H. Wang, X. Cheng, Z. Du, *RSC Adv.*, **9**, 7411-7419 (2019). DOI: 10.1039/C8RA09838G.
28. K. Andrianova, L.M. Amirova, A. Gaifutdinov, V. Miluykov, A. Zagidullin, R.R. Amirov, *Results Eng.*, **14**, Article 100421 (2022). DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100421.
29. W. Liu, X. Chen, Y. Zhang, Y. Huang, S. Liu, A. Zhang, S. Huang, *Polym. Degrad. Stab.*, **242**, Article 111681 (2025). DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2025.111681.
30. W. Yang, Z. Wang, X. Zhu, Y. Zhang, Y. Luo, X. Wang, *Polymer*, **306**, Article 127210 (2024). DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127210.
31. Y. Hou, L. Liu, S. Qiu, X. Zhou, Z. Gui, Y. Hu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, Article 7b19395 (2018). DOI: 10.1021/acsami.7b19395.
32. R. Lyon, M. Zarzecki, M.R. Fullmer, R. Walters, S. Crowley, *Proc. 21st Annu. Conf. Recent Adv. Flame Retard. Polym. Mater.*, 405-417 (2010).
33. S. Hong, J. Yang, S. Ahn, Y. Mun, G. Lee, *Fire Mater.*, **28**, 25-31 (2004). DOI: 10.1002/fam.840.
34. R. Crossley, P. Schubel, A. Stevenson, J. Reinf. *Plast. Compos.*, **33**, 58-68 (2013). DOI: 10.1177/0731684413502108.
35. B. Shi, C. Yang, H. Long, *Fire*, **6**, 11, Article 431 (2023). DOI: 10.3390/fire6110431.
36. Szczotok, D. Madsen, A. Serrano, M. Carmona, P. Van Hees, J. Rodríguez, A.-L. Kjøniksen, *J. Mater. Sci.*, **56**, 1-17 (2021). DOI: 10.1007/s10853-020-05389-6.
37. O. Fischer, D. Pospiech, A. Korwitz, K. Sahre, L. Häußler, P. Friedel, D. Fischer, C. Hamisch, Y. Bykov, M. Döring, *Polym. Degrad. Stab.*, **96**, 12, 2198-2208 (2011). DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2011.09.006.
38. B. Liang, K. Liu, J. Dai, W. Chen, W. Lu, *Polym. Degrad. Stab.*, **225**, Article 110807 (2024). DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110807.
39. C.K. Kundu, B. Yu, C.S.R. Gangireddy, X. Mu, B. Wang, X. Wang, L. Song, Y. Hu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**, 6, 1376-1384 (2017). DOI: 10.1021/acs.iecr.6b04188.
40. K. Liu, Y. Li, L. Tao, R. Xiao, *RSC Adv.*, **17**, 8, 9261-9271 (2018). DOI: 10.1039/C7RA13228J.
41. F. Seidi, E. Movahedifar, G. Naderi, et al., *Polymers*, **12**, 8, Article 1701 (2020). DOI: 10.3390/polym12081701.
42. W. Huang, K. Wang, C. Tu, X. Xu, Q. Tian, C. Ma, Q. Fu, Y. Yan, *Polymers*, **14**, Article 2372 (2022). DOI: 10.3390/polym14122372.
43. R. Chen, K. Hu, H. Tang, J. Wang, F. Zhu, H. Zhou, *Polym. Degrad. Stab.*, **166**, 334-343 (2019). DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.06.011.
44. H. Birtane, *Grid Conf. Proc.*, 169-175 (2020). DOI: 10.24867/GRID-2020-p16.
45. K.A. Salmeia, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **113**, 119-134 (2015). DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.12.014.
46. G. Marosi, B. Szolnoki, K.B. Bocz, A. Toldy, in *Reactive and Additive Phosphorus-Based Flame Retardants of Reduced Environmental Impact*, Elsevier, Amsterdam, 2014. DOI: 10.1016/B978-0-444-53808-6.00005-6.
47. D. Kockott, *Polym. Test.*, **110**, Article 107550 (2022). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107550.
48. L. Cai, F. Xin, C. Zhai, Y. Chen, B. Xu, X. Li, *RSC Adv.*, **11**, 12, 6781-6790 (2021). DOI: 10.1039/d0ra08982f.
49. M. Ou, R. Lian, R. Li, J. Cui, H. Guan, J. Zhu, L. Liu, C. Jiao, C. Xilei, *Macromol. Rapid Commun.*, **44**, Article e2300262 (2023). DOI: 10.1002/marc.202300262.
50. Buczko, T. Stelzig, L. Bommer, D. Rentsch, M. Heneczowski, S. Gaan, *Polym. Degrad. Stab.*, **107**, 158-165 (2014). DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.05.017.
51. S. Chernyy, S. Ulah, G. Sørensen, S. Tordrup, P. Pedersen, K. Almdal, *J. Appl. Polym. Sci.*, **132**, Article 41955 (2015). DOI: 10.1002/app.41955.

© **А. Е. Шкуро** – д-р техн. наук, доцент, проф. каф. Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров (ТЦБПиПП), Уральский госуд. лесотехнический университет (УГЛТУ), Екатеринбург, zj@weburg.me; **Т. В. Якубова** – канд. хим. наук, доцент каф. Химии и процессов горения, Уральский институт государственной противопожарной службы (УИ ГПС) МЧС России, Екатеринбург, Россия, tatanaakubova71723@gmail.com; **А. В. Артемов** – канд. техн. наук, доцент, каф. ТЦБПиПП, УГЛТУ, artemovav@m.usfeu.ru; **Г. А. Плюснин** – преподаватель каф. Пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств (ПАСТиСТС) УИ ГПС МЧС России, reno499@yandex.ru; **Д. А. Хатыпов** – преподаватель каф. ПАСТиСТС, УИ ГПС МЧС России, den-khatypov@mail.ru.

© **A. E. Shkuro** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Professor of the Department of Pulp and Paper Production and Polymer Processing Technologies (PPP&PPT), Ural State Forestry University (USFU), Yekaterinburg, Russia, zj@weburg.me; **T. V. Yakubova** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Chemistry and Combustion Processes, Ural Institute of State Fire Service (UISFS) of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Yekaterinburg, Russia, tatanaakubova71723@gmail.com; **A. V. Artemov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the PPP&PPT department, USFU, artemovav@m.usfeu.ru; **G. A. Plyusnin** – Lecturer of the Department of Firefighting, Emergency Rescue Equipment, and Special Technical Means (FEREST), UI SFS of Russia, reno499@yandex.ru; **D. A. Khatypov** – Lecturer of the FEREST department, UI SFS of Russia, den-khatypov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 12.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 31.10.25.