УДК 614.841.4
DOI 10.47367/0021-3497_2025_2_56

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПРИДАНИЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫМ МАТЕРИАЛАМ

USING LOW-TEMPERATURE PLASMA TO IMPRESS FIRE-RESISTANT PROPERTIES TO POLYMERIC MATERIALS

В.А. ТИТОВ, С.Н. УЛЬЕВА, А.Л. НИКИФОРОВ, А.М. БАУСОВ

V.A. TITOV, S.N. ULYEVA, A.L. NIKIFOROV, A.M. BAUSOV

(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)

(Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFC of EMERCOM of Russia)

E-mail: titov25@gmail.com, jivotjagina@mail.ru, anikiforoff@list.ru, bausovaleksey@yandex.ru

Плазмохимическая обработка полимерных материалов, включая текстильные, уже вышла за рамки лабораторных испытаний и используется в промышленности. В статье представлен обзор публикаций последних 20 лет, которые отражают применение неравновесной газоразрядной плазмы для огнезащитной отделки полимерных материалов. Рассмотрены способы генерации плазмы при пониженном и атмосферном давлении и используемые установки для обработки материалов. Выделены группы плазмохимических процессов, которые приводят к модифицированию поверхности. Рассмотрены многочисленные примеры применения плазмы для нанесения слоев антипиренов на полимеры как методом инициированной плазмой полимеризации, так и постплазменной прививки. Показана возможность закрепления наночастиц оксидов металлов на поверхности полимерных носителей с использованием плазмохимической обработки.

Plasma-chemical treatment of polymer materials, including textiles, has already gone beyond laboratory testing and is used in industry. The article provides a review of publications over the past 20 years, which reflect the use of nonequilibrium gas-discharge plasma for fire-retardant finishing of polymer materials. Methods for generating plasma at reduced and atmospheric pressure and the equipment used for processing materials are considered. Groups of plasma-chemical processes that lead to surface modification are identified. Numerous examples of plasma application for applying fire retardant layers to polymers by both plasma-initiated polymerization and post-plasma grafting are considered. The possibility of fixing metal oxide nanoparticles on the surface of polymer carriers using plasma-chemical treatment has been shown.

Ключевые слова: антипирен, полимер, ткань, неравновесная плазма, модифицирование, огнезащита, огнезащитная обработка.

Keywords: fire retardant, polymer, fabric, nonequilibrium plasma, modification, fire protection, fire protection treatment

Введение

Текстильные материалы из натуральных или синтетических волокон широко применяются в самых различных сферах, включая промышленность, транспорт, интерьеры зданий и одежду. Сама химиче-

ская природа тканей делает их пожароопасными и требует придания огнезащитных свойств. Высокая устойчивость полимерных материалов к возгоранию является обязательным условием их применения в строительстве, на транспорте, а также в производстве спецодежды для работающих в условиях повышенных тепловых нагрузок, интенсивного лучистого и конвективного нагрева, при рисках воздействия открытого пламени, например боевой одежды пожарных, спецодежды металлургов, сварщиков и т.п. [1…3].

Требования к пожарной безопасности текстильных материалов установлены Федеральным законом № 123-ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», ст. 135 «Требования пожарной безопасности к применению текстильных и кожевенных материалов, к информации об их пожарной опасности», а также рядом других нормативных документов.

К настоящему времени разработано много антипиренов, доказавших свою пригодность для огнезащиты текстиля, однако и сегодня актуальны задачи создания новых огнезащитных составов и совершенствования способов их нанесения. При этом предъявляются все более высокие требования не только к эффективности, но и к экологической безопасности как самих составов, так и способов их нанесения [3…7].

Современные исследования в области огнезащитной обработки текстиля отражены в ряде обзоров [2…9]. Краткая характеристика основных методов формирования огнезащитных покрытий на полимерах представлена в табл. 1 [4]. Наряду с неоспоримыми достоинствами все методы обладают определенными недостатками или ограничениями, преодоление которых должно способствовать совершенствованию технологий и материалов.

Таблица 1

Методы обработки	Преимущества	Недостатки
Ковалентная химическая модификация поверхности	Большое разнообразие возможных химических составов; можно наносить на любую подложку; можно использовать существующее промышленное оборудование для нанесения покрытий на текстиль	Энергозатратное или трудоемкое отверждение покрытий; часто используются органические растворители; низкая стойкость к истиранию
Модификация поверхности с помощью неравновесной плазмы	Очень эффективно при нанесении огнестойкого вещества в малых количествах; не используются растворители; покрытия устойчивы к стирке	Ограниченный выбор компонентов; во время обработки возможно повреждение подложки
Золь-гель синтез	Несколько этапов обработки; устойчивость покрытий к стирке; подложка сохраняет желаемый вид	Необходима термическая обработка; ограниченное количество коммерчески доступных прекурсоров
Послойная сборка	Большое количество комбинаций ингредиентов, многие из которых имеют природное происхождение и/или являются биоразлагаемыми; подходит для различных поверхностей; не требует специальной обработки	Большое количество этапов обработки; требуется большой объем раствора; низкая устойчивость к стирке

Анализ литературы показывает, что один из подходов к эффективной огнезащитной обработке текстиля связан с использованием неравновесной (низкотемпературной) плазмы. Цель данного обзора – показать возможности применения плазмы для придания пожаробезопасных свойств полимерам и рассмотреть используемые при этом методы плазмохимической обработки материалов.

Неравновесная плазма для модифицирования полимерных материалов. Плазма – это квазинейтральная газообразная среда, состоящая из электронов, ионов и нейтральных частиц (атомов, молекул и радикалов) как в основном, так и в возбужденных состояниях. Интенсивные ис-

следования и разработки в области модифицирования синтетических и природных полимерных материалов (пленок, волокон, тканей) с использованием неравновесной плазмы начались в 70-х годах XX века. В качестве генераторов плазмы используются как газовые разряды при пониженном давлении (разряд постоянного тока, высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) разряды), так и разряды при атмосферном давлении (коронный и поверхностно-барьерный, тлеющий разряд, стабилизированный быстрым потоком газа, плазменные струи, создаваемые при различной частоте электромагнитного поля) [10…15].

Неравновесная плазма при пониженном давлении характеризуется низкой температурой газа (~ 300 К) при средней энергии электронов, отвечающей температуре ~ 10000…50000 К. Следствиями сильной неравновесности плазмы являются высокие (сверхравновесные) концентрации активных частиц при низкой температуре газа, а также низкая температура обрабатываемых материалов, что делает плазму привлекательным инструментом модифицирования нетермостойких материалов.

Активными компонентами плазмы, которые могут приводить к модифицированию, являются электроны и ионы, атомы и радикалы, возбужденные молекулы, а также вакуумное ультрафиолетовое излучение. Основная роль в образовании отмеченных активных компонентов принадлежит столкновениям электронов с атомами и молекулами исходного газа. Высокая реакционная способность активных частиц приводит к тому, что изменениям вследствие плазмохимической модификации подвергается лишь тонкий поверхностный слой материала (от 10 нм до нескольких мкм), основная же его масса не изменяется и сохраняет свои физико-химические свойства.

К модифицированию поверхности полимеров в плазме ведут несколько типов взаимодействий:

1. На поверхности обрабатываемого материала образуются новые химические соединения только из газообразных компонентов плазмы. Примеры таких процессов – плазмохимическая полимеризация и осаждение из плазмы соединений металлов при реактивном магнетронном распылении [15].

2. Реакции активных частиц плазмы с макромолекулами, которые приводят к формированию в тонком поверхностном слое новых функциональных групп, которые могут разрушаться в дальнейшем до летучих соединений под действием плазмы. При длительном воздействии плазмы (с уносом газообразных продуктов потоком) процесс становится стационарным. При этом на поверхности формируется тонкий модифицированный слой, отличающийся по структуре и свойствам от исходного полимерного материала.

3. Активация поверхности, наблюдаемая при воздействии плазмы, может сохраняться достаточно долго (минуты, а в ряде случаев и часы). Это позволяет провести химическое модифицирование поверхности и после обработки в плазме. Примером такого процесса является прививочная полимеризация из газовой или жидкой фазы, инициированная плазменной обработкой. Известно, что воздействие неравновесной плазмы приводит к образованию макрорадикалов, стационарные концентрации которых достигают $10^{13}…10^{15}$ $см^{-3}$. Реакции макрорадикалов и функциональных групп, сформированных на поверхности материала при плазменной обработке, отвечают за инициирование прививочной полимеризации на поверхности.

Бесспорным преимуществом «сухой» плазмохимической обработки по сравнению с традиционными химико-технологическими процессами является то, что она не требует использования воды или иных растворителей, что обеспечивает экологическую чистоту производства и его экономичность. Достаточно сказать, что в традиционных технологиях на окрашивание 1 кг текстильного материала расходуется от 50 до 100 л воды, которая требует предварительной подготовки и последующей очистки промышленных стоков. Еще одно важное преимущество плазмохимических процессов состоит в возможности получе-

ния продуктов, недоступных для изготовления с использованием традиционных квазиравновесных химических процессов.

Уже к 90-м годам прошлого века было создано промышленное оборудование для обработки тканей и полимерных пленок в плазме пониженного давления. Опыт его эксплуатации подтверждает плодотворность и перспективность плазмохимической обработки [14, 15]. На рис. 1 показана схема промышленной установки KPR-270 для обработки пленок, тканей и нетканых волокнистых материалов в плазме пониженного давления, которая позволяет обрабатывать полотна шириной до 260 см. Технические характеристики некоторых промышленных установок для обработки тканей и пленок в плазме пониженного давления приведены в табл. 2, примеры их использования для модифицирования полимерных материалов рассмотрены в работах [10, 15].

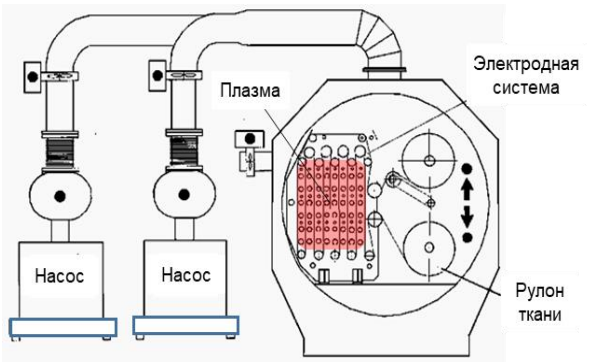

Рис. 1

Таблица 2

Установка	Ширина материала, мм	Диаметр рулона, мм	Скорость обработки, м/мин	Длина зоны обработки, м	Мощность, кВт	Диаметр камеры, мм
LPCH-180SH	1700	1350	0 - 80	8.5	90	1600
KPR-180/1	1700	1050	0 - 80	6.7	80	2000
KPR-270	2600	700	0 - 80	5.0	85	2000
KPR-200	2000	700	0 - 80	5.4	80	2000
KPR-50/50-1	500	500	0 - 50	2.5	3.2	1050

В последние годы внимание технологов все больше привлекает плазма атмосферного давления, которая не требует создания вакуума [16]. Примером такой плазмы является плазма поверхностно-барьерного разряда, которая широко применяется для обработки полимеров. Принципиальная схема устройства для создания барьерного разряда показана на рис. 2. С начала XXI века значительный интерес вызывает газоразрядная плазма, контактирующая с жидкой фазой, как инструмент модифицирования высокомолекулярных соединений и создания новых композиционных материалов [17, 18].

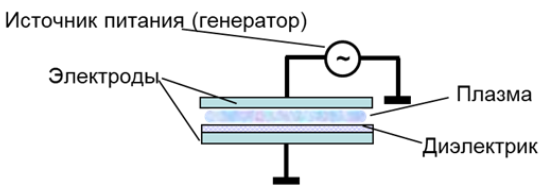

Рис. 2

Плазма в огнезащитной отделке текстильных материалов. Первая работа, в которой была предпринята попытка использовать неравновесную плазму для придания полимерным материалам огнезащитных свойств, опубликована в 1990 году [19]. В этом исследовании методом полимеризации, инициированной плазмой при пониженном давлении, получены пленки на основе гексаметилдисилоксана, этилдихлорфосфата и трис(бутоксиэтил)-фосфата на поверхности полиакрилонитрильных волокон. Хотя такая обработка лишь незначительно улучшила огнезащитные свойства волокон, эта публикация стимулировала дальнейшие исследования. Так, авторы работы [20] получили пленки толщиной около 50 мкм на поверхности полиамида-6 (ПА-6) полимеризацией тетраметилдисилоксана в плазме СВЧ разряда (2,45 ГГц) при пониженном давлении (420 Па). Схема использованной для этих целей установки показана на рис. 3.

Основным плазмообразующим газом служил азот, к которому добавляли пары мономера. Плазмохимическое нанесение полисилоксановой пленки позволило снизить максимальную скорость тепловыделения при нагреве ПА-6 на 30%.

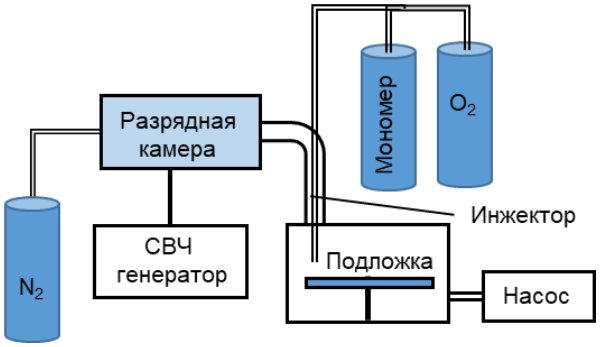

Рис. 3

В работе [21] плазма СВЧ разряда использована для прививки и полимеризации фторированного акрилатного мономера (1,1,2,2-тетрагидроперфтордецилакрилата) на полиамид-6. Полученное покрытие охарактеризовано с использованием методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, ИК-спектроскопии МНПВО, сканирующей электронной микроскопии. Огнестойкость материала оценивали с помощью метода конического калориметра. Эксперименты показали, что скорость выделения тепла модифицированным полимером снизилась примерно на 50% по сравнению с исходным материалом.

В дальнейшем был разработан ряд методов получения огнезащитных покрытий с использованием плазмы как при пониженном, так и при атмосферном давлении, испытаны режимы нанесения различных покрытий [22…26].

Авторы статьи [22] нанесли слой 1,1,2,2-тетрагидроперфтордецилакрилата на подложки из полиамида, предварительно активированные в СВЧ кислородной плазме при мощности 100 Вт и длительности 10 мин. Обработанные в плазме образцы погружали при комнатной температуре на 3 мин в раствор (c=100 г/л) 1,1,2,2-тетрагидроперфтордецилакрилата в петролейном эфире с добавками фотоинициатора и сшивающего агента, после чего обрабатывали плазмой в аргоне (при скорости потока 0,5 л/мин; P=100 Вт, t=10 мин), чтобы закрепить привитый слой полимера. После этого образцы промывали хлороформом для удаления остаточного мономера и высушивали при 60 °С. Испытания показали, что скорость тепловыделения при нагреве модифицированного полиамида снизилась примерно на 50% по сравнению с исходным материалом.

С помощью плазменной обработки получено многофункциональное огнестойкое, гидрофобное и олеофобное покрытие для хлопка [23]. Нанесение этого покрытия путем плазменной сополимеризации двух мономеров на основе фосфонатов и фторированных акрилатов привело к значительному увеличению предельного кислородного индекса, а также к существенному увеличению углов смачивания модифицированной поверхности водой и маслом.

Плазменную обработку успешно использовали для формирования барьерного слоя на основе триметилбората на нетканой подложке из двуосноориентированного полипропилена [24]. Полученное борсодержащее покрытие значительно замедлило термодеструкцию полимера при воздействии высоких температур, а также увеличило предельный кислородный индекс.

За последнее десятилетие плазмохимические процессы позволили получить некоторые покрытия с замечательными свойствами, в том числе устойчивые к стирке и значительно снижающие тепловыделение при горении легковоспламеняющихся полимерных материалов [25…31]. Например, полимерное покрытие на основе фосфоната/фосфонамида было нанесено на шелк, что привело к увеличению кислородного индекса и снижению тепловыделения более чем на 30%. При последующей плазменной обработке в присутствии гексафторида серы (SF_6) поверхность приобретала водоотталкивающие свойства и высокую устойчивость к истиранию [25].

Полимеризация, инициированная плазмой низкого давления в смеси паров гексаметилдисилоксана с кислородом, была использована для осаждения слоев, подобных по структуре аморфному оксиду кремния (SiO_2), на полиэтилен и полисти-

рол [26]. Далее на сформированную в плазме тонкую (~0,5 мкм) пленку наносили слой жидкого стекла толщиной от 5 до 40 мкм. Испытаны адгезия полученных двухслойных систем и их огнестойкость, а также скорость осаждения и состав сформированных слоев в зависимости от параметров плазмы, таких как соотношение концентраций мономера и кислорода, давление и мощность, подводимая к разряду. Термические свойства композитов проанализированы с помощью термогравиметрического анализа. Огнезащитные свойства определяли путем воздействия пламени, а поведение покрытий на полимерах во время горения наблюдали визуально. Испытания показали, что полученные покрытия предотвращают стекание расплава при высокотемпературном воздействии и увеличивают индукционный период возгорания по меньшей мере в четыре раза как для полиэтилена, так и для полистирола [26].

Авторы работы [27] применили плазму поверхностно-барьерного разряда при атмосферном давлении для обработки хлопковой ткани перед нанесением коммерческих антипиренов «Pyrovatex CP New» и «Knittex FFRC». Эти составы обладают превосходным огнезащитным действием, но их закрепление на ткани требует длительной термообработки при высоких температурах, что сопровождается заметной потерей механической прочности ткани. Плазменная обработка позволила снизить время термообработки со 114 до 90 с, а температуру – от 180 до 160 °С и получить при этом огнестойкую ткань с предельным кислородным индексом (LOI) ≥ 25% при минимальной потере прочности материала.

Плазма барьерного разряда при атмосферном давлении успешно использована и для сополимеризации гексаметилдисилоксана с триметилфосфатом на поверхности полимеров. Покрытие толщиной ~5 мкм наносили на листы из поликарбоната или полиамида-6. Для модифицированного поликарбоната обнаружено увеличение индукционного периода возгорания почти в три раза и снижение пиковой скорости тепловыделения на 23%. В случае полиамида-6 конусная калориметрия показала, что полученное в плазме покрытие полностью предотвращает возгорание [28].

Помимо инициирования полимеризации, плазменная обработка способствует закреплению неорганических наночастиц на поверхности полимерных материалов, что ведет к улучшению огнезащитных свойств [26…29]. Например, в работах [29, 30] показано, что нанопластинки глины прилипают к модифицированной в плазме полимерной подложке благодаря присущему им поверхностному заряду и позволяют создавать эффективный неорганический барьер, улучшающий огнезащитные свойства полимеров. Авторы работы [29] обрабатывали струей плазмы аргона при атмосферном давлении хлопок и метаарамид, пропитанные коммерческими огнестойкими составами Proban и Nomex. После плазменной обработки на поверхность наносили тонкий слой нанопластинок глины (монтмориллонита) или полисилоксана либо слои обоих веществ вместе. Использование полисилоксановой пленки обеспечивало устойчивость покрытий к стирке за счет формирования полимерной сетки вокруг волокон, покрытых монтмориллонитом. Во всех случаях наблюдалось улучшение огнестойкости текстильных субстратов при высоких значениях теплового потока (70 кВт/м^2). Кроме того, плазменная обработка привела к лучшей сохранности огнезащитных характеристик после стирки материалов.

В работе [30] исследовано влияние модифицирования ткани из полиэтилентерефталата (ПЭТ) в плазме кислорода на последующее осаждение на волокна частичек монтмориллонитовой глины при погружении обработанной ткани в суспензию. Обработку проводили при давлении 50 Па, мощности разряда от 50 до 120 Вт и времени воздействия от 15 до 180 с. Испытаны термические и огнезащитные свойства модифицированной ткани. Найдено, что после плазмохимической обработки с последующей сорбцией монтмориллонита снизилась пиковая скорость горения ПЭТ-ткани на ~10%, а время до воспламенения увеличилось более чем в два раза. Более того, если ткань погружали в суспензию

без предварительной плазменной обработки, то полученный материал значительно хуже противостоял возгоранию, что указывает на ключевую роль плазмохимического модифицирования в закреплении монтмориллонита на поверхности волокон ПЭТ. Необходимость предварительной активации поверхности текстильных субстратов в плазме для нанесения наночастиц TiO_2 показана и в работе [31]. Плазменная обработка увеличивает стабильность и долговечность нанокомпозитных покрытий во время их эксплуатации.

Авторы работы [33] исследовали влияние предварительной плазмохимической модификации поверхности ткани из волокон рами на результаты ее огнестойкой обработки с использованием метода послойной сборки. Ткань обрабатывали в низкотемпературной плазме в азоте или кислороде при давлении 20 Па, мощности разряда 100 Вт и длительности обработки 180 с. После плазменной обработки на поверхность ткани методом послойной сборки наносили огнестойкое покрытие на основе полиэтиленимина и полифосфата аммония (PEI/APP). Термические свойства и огнестойкость модифицированных тканей характеризовали с использованием данных термогравиметрического анализа, определения кислородного индекса, испытаний методами вертикального горения и конического калориметра. Эксперименты показали, что нанесенные покрытия PEI/APP снизили скорость термического разложения ткани и улучшили способность к обугливанию при высокой температуре, причем наиболее высокие результаты получены при использовании плазмы в кислороде. Заметно увеличился кислородный индекс (до 30,6%), ткань приобрела эффект самозатухания. Улучшение огнестойкости ткани авторы объяснили тем, что плазменная обработка обеспечивает большее количество PEI/APP, адсорбированных на поверхности волокон.

Важным шагом к промышленному использованию плазмы атмосферного давления стало включение в процессы плазменной обработки дополнительных источников энергии, которые способствуют изменению характера связей и формированию новых ковалентных связей на модифицируемой поверхности. Например, в работе [34] описана установка, в которой наряду с поверхностно-барьерным разрядом используется излучение УФ-лазера, способное разрушать химические связи (C–C или C–N), присутствующие в макромолекулах полимеров. Масштабирование процессов такой совмещенной обработки позволило наладить промышленный выпуск тканей с различными видами отделки, например, гидрофобных или антимикробных тканей, а также тканей с огнезащитными покрытиями без использования жидких реагентов [34]. Этот результат представляет собой значительный шаг вперед в широком использовании плазменных методов обработки поверхности для нанесения огнезащитных покрытий и позволяет предположить, что эта область будет оставаться перспективной в ближайшие годы.

Заключение

Плазмохимическая обработка является экономичным и экологически чистым методом модифицирования поверхности полимерных материалов. Достоинством низкотемпературной плазмы является то, что изменению подвергается лишь тонкий поверхностный слой материала, его объемные свойства остаются неизменными.

В последние годы в лабораторных условиях успешно апробирован ряд методов придания полимерным материалам огнезащитных свойств с использованием плазмы как при пониженном, так и при атмосферном давлении. Показаны возможности нанесения огнезащитных слоев на полимерные (текстильные) материалы в результате инициированной плазмой полимеризации или пост-плазменной прививки.

Обработка полимеров в плазме позволяет фиксировать на поверхности и неорганические наночастицы, создавая при этом огнезащитные барьеры.

Опыт эксплуатации промышленного оборудования для плазмохимического модифицирования тканей и полимерных пленок позволяет надеяться на широкое использование плазмохимических методов

придания огнезащитных свойств широкому кругу полимерных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mamay Daget T., Birlie Kassie B., Tadesse Abate M. et al.* Eco-friendly and bio-based approaches for flame-retardant functionalization of textile materials: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2024. 63 (14). P. 1887…1916.

2. *Гришина Е.П.* Огнезащитная обработка текстильных материалов. Перспективы применения золь-гель технологии // Пожарная и аварийная безопасность. 2021. № 1 (20). С. 12…21.

3. *Horrock A.R.* Flame Retardant finishes. In Textiles: Current Developments and Future Trends; Bahners, T., Mittal, K., Eds.; Scrivener Publishing LLC: Beverly, MA, USA, 2017; P. 69…128.

4. *Lazar S.T., Kolibaba T.J. & Grunlan J.C.* Flame-retardant surface treatments // Nat Rev Mater. 2020. 5, P. 259…275.

5. *Chanchal Kumar Kundu, Zhiwei Li, Lei Song, Yuan Hu.* An overview of fire retardant treatments for synthetic textiles: From traditional approaches to recent applications // European Polymer Journal. 2020. Vol. 137. 10991.

6. *Ленартович Л.А., Прокопчук Н.Р., Касперович О.М. и др.* Влияние наночастиц оксидов металлов на свойства полимерных материалов (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283). С. 65…76.

7. *Спиридонова В.Г., Циркина О.Г., Салихова А.Х., Чуприна О. С.* Анализ методов испытаний по определению классификационных показателей пожарной опасности текстильных материалов и проблемные вопросы их применения // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (54). С. 109…123.

8. *Коломейцева Э.А., Морыганов А.П.* Огне-, термо- и комплексная защитная отделка текстильных технических материалов с использованием препаратов Тезагран // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. № 6(384). С. 46…50.

9. *Ульева С.Н., Никифоров А.Л., Румянцева В.Е. и др.* Защита целлюлозных материалов от воздействия высоких температур и открытого пламени // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. №2 (410) С. 207…212.

10. *Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И.* Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. М.: Наука, 2004. 496 с.

11. *Zill A., Oliveira F.R., Souto A.P.* Plasma Treatment in Textile Industry // Plasma Processes and Polymers. 2014. 12 (2), P. 98…131.

12. *Radetić M., Marković D.* A review on the role of plasma technology in the nano-finishing of textile materials with metal and metal oxide nanoparticles // Plasma Processes and Polymers. 2022. T. 19. №. 4. P. 2100197.

13. *Ma C. et al.* Plasma-controlled surface wettability: Recent advances and future applications // International Materials Reviews. 2023. T. 68. №. 1. P. 82…119.

14. Sishoo R. Plasma Technologies for Textile. Woodhead Publishing Group. 2007.

15. *Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V. et al.* Modification of textile materials by the deposition of nanocoatings by magnetron ion-plasma sputtering // Russian Journal of General Chemistry. 2013. V. 83, № 1. P. 157 … 163.

16. *Jang H.J. et al.* A review of plasma synthesis methods for polymer films and nanoparticles under atmospheric pressure conditions // Polymers. 2021. T. 13. №. 14. P. 2267.

17. *Шукуров А.* Плазменно-растворная обработка природных полимерных материалов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 4…30.

18. *Agafonov A.V., Sirotkin N.A., Titov V.A., Khlyustova A.V.* Low-temperature underwater plasma as an instrument to manufacture inorganic nanomaterials // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. V. 67. № 3. P. 253…261.

19. *Akovali G., Gundogan G.* Studies on flame retardancy of polyacrylonitrile fiber treated by flame-retardant monomers in cold plasma // Journal of applied polymer science. 1990. T. 41. №. 9-10. P. 2011…2019.

20. *Bourbigot S. et al.* New approach to flame retardancy using plasma assisted surface polymerisation techniques // Polymer degradation and stability. 1999. T. 66. №. 1. P. 153…155.

21. *Schartel B., Kühn G., Mix R., Friedrich J.* Surface controlled fire retardancy of polymers using plasma polymerisation. Macromol. Mater. Eng. 287, 579–582 (2002).

22. *Errifai I. et al.* Elaboration of a fire retardant coating for polyamide-6 using cold plasma polymerization of a fluorinated acrylate // Surface and Coatings Technology. 2004. T. 180. P. 297…301.

23. *Tsafack M.J., Levalois-Grützmacher J.* Towards multifunctional surfaces using the plasma-induced graft-polymerization (PIGP) process: Flame and waterproof cotton textiles // Surface and coatings technology. 2007. T. 201. №. 12. P. 5789…5795.

24. *Yavuz H., Rzaev Z., Dilsiz N.* Characterisation of flame retardant plasma polymer deposited BOPP film // Plastics, rubber and composites. 2008. T. 37. №. 5-6. P. 268…275.

25. *Kamlangkla K., Hodak S.K., Levalois-Grützmacher J.* Multifunctional silk fabrics by means of the plasma induced graft polymerization (PIGP) process // Surface and Coatings Technology. 2011. T. 205. №. 13-14. P. 3755…3762.

26. *Faraq Z.R. et al.* Deposition of thick polymer or inorganic layers with flame-retardant properties by combination of plasma and spray processes // Surface and coatings technology. 2013. T. 228. P. 266…274.

27. *Nguyen Thi H. et al.* Application of plasma activation in flame-retardant treatment for cotton fabric // Polymers. 2020. T. 12. №. 7. P. 1575.

28. *Hilt F. et al.* Efficient flame retardant thin films synthesized by atmospheric pressure PECVD through the high co-deposition rate of hexamethyldisiloxane and triethylphosphate on polycarbonate and polyamide-6 substrates // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. T. 8. №. 19. P. 12422…12433.

29. *Horrocks A.R. et al.* Surface modification of fabrics for improved flash-fire resistance using atmospheric pressure plasma in the presence of a functionalized clay and polysiloxane // Polymers for Advanced Technologies. 2011. T. 22. №. 1. P. 22…29.

30. *Carosio F., Alongi J., Frache A.* Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology, thermal stability and combustion behavior of PET fabrics // European Polymer Journal. 2011. T. 47. №. 5. P. 893…902.

31. *Radetić M.* Functionalization of textile materials with TiO2 nanoparticles // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2013. T. 16. P. 62…76.

32. *Киселев А.М., Румянцев Е.В., Одинцова О.И., Румянцева В.Е.* Современные технологии получения текстильных материалов со специальными свойствами и области их применения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2(398). С. 121…133.

33. *Wang H., Yan H., Fang Z.* Fabrication and properties of PEI/APP layer-by-layer coated ramie fabric combined with low-temperature plasma treatment // Fire and Materials. 2022. T. 46. №. 1. P. 117…129.

34. *Horrocks A. R. et al.* Environmentally sustainable flame retardant surface treatments for textiles: The potential of a novel atmospheric plasma/UV laser technology // Fibers. 2018. T. 6. №. 2. P. 31.

REFERENCES

1. *Mamay Daget T., Birlie Kassie B., Tadesse Abate M. et al.* Eco-friendly and bio-based approaches for flame-retardant functionalization of textile materials: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2024. 63 (14). P. 1887…1916.

2. *Grishina E.P.* Ognezashchitnaya obrabotka tekstil'nyh materialov. Perspektivy primeneniya zol'-gel' tekhnologii // Pozharnaya i avarijnaya bez-opasnost'. 2021. № 1 (20). P. 12…21.

3. *Horrock A.R.* Flame Retardant finishes. In Textiles: Current Developments and Future Trends; Bahners, T., Mittal, K., Eds.; Scrivener Publishing LLC: Beverly, MA, USA, 2017; P. 69…128.

4. *Lazar S.T., Kolibaba T.J. & Grunlan J.C.* Flame-retardant surface treatments // Nat Rev Mater. 2020. 5, P. 259…275.

5. *Chanchal Kumar Kundu, Zhiwei Li, Lei Song, Yuan Hu.* An overview of fire retardant treatments for synthetic textiles: From traditional approaches to recent applications // European Polymer Journal. 2020. Vol. 137. 10991.

6. *Lenartovich L.A., Prokopchuk N.R., Kasperovich O.M. et al.* Vliya-nie nanochastic oksidov metallov na svojstva po-limernyh materialov (obzor) // Trudy BGTU. Ser. 2, Himicheskie tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya. 2024. № 2 (283). P.65…76.

7. *Spiridonova V.G., Cirkina O.G., Salihova A.H., Chuprina O.S.* Analiz metodov ispytanij po opredeleniyu klassifikacionnyh pokazatelej pozharnoj opasnosti tekstil'nyh materialov i problemnye voprosy ih primeneniya // Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. 2025. № 1 (54). S. 109…123.

8. *Kolomeytseva E.A., Moryganov A.P.* Fire-, heat- and complex protective finishing of textile technical materials using preparations Tezagran // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2019. № 6(384). P. 46…50.

9. *Ulyeva S.N., Nikiforov A.L., Rumyantseva V.E., etc.* Protection of cellulose materials from exposure to high temperatures and open flames // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. №2 (410). P. 207…212.

10. *Zill A., Oliveira F.R., Souto A.P.* Plasma Treatment in Textile Industry // Plasma Processes and Polymers. 2014. 12 (2). P. 98…131.

11. *Kutepov A.M., Zaharov A.G., Maksimov A.I.* Vakuumno-plazmennoe i plazmenno-rastvornoe modificirovanie polimernyh materialov. M.: Nauka, 2004. 496 s.Zill A., Oliveira F.R., Souto A.P. Plasma Treatment in Textile Industry // Plasma Processes and Polymers. 2014. 12 (2). P. 98…131.

12. *Radetić M., Marković D.* A review on the role of plasma technology in the nano-finishing of textile materials with metal and metal oxide nanoparticles // Plasma Processes and Polymers. 2022. T. 19. №. 4. P. 2100197.

13. *Ma C. et al.* Plasma-controlled surface wettability: Recent advances and future applications // International Materials Reviews. 2023. T. 68. №. 1. P. 82…119.

14. *Sishoo R.* Plasma Technologies for Textile. Woodhead Publishing Group. 2007.

15. *Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V. et al.* Modification of textile materials by the deposition of nanocoatings by magnetron ion-plasma sputtering // Russian Journal of General Chemistry. 2013. V. 83, № 1. P. 157 … 163.

16. *Jang H. J. et al.* A review of plasma synthesis methods for polymer films and nanoparticles under atmospheric pressure conditions // Polymers. 2021. T. 13. №. 14. P. 2267.

17. *Shukurov A.* Plazmenno-rastvornaya obrabotka prirodnyh polimernyh materialov // Izv. vuzov. Himiya i him. tekhnologiya. 2019. T. 62. Issue 7. P. 4…30.

18. *Agafonov A.V., Sirotkin N.A., Titov V.A., Khlyustova A.V.* Low-temperature underwater plasma as an instrument to manufacture inorganic nanomaterials // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. V. 67. № 3. P. 253…261.

19. *Akovali G., Gundogan G.* Studies on flame retardancy of polyacrylonitrile fiber treated by flame-retardant monomers in cold plasma // Journal of applied polymer science. 1990. T. 41. №. 9-10. P. 2011…2019.

20. *Bourbigot S. et al.* New approach to flame retardancy using plasma assisted surface polymerisation techniques // Polymer degradation and stability. 1999. T. 66. №. 1. P. 153…155.

21. *Schartel B., Kühn G., Mix R., Friedrich J.* Surface controlled fire retardancy of polymers using plasma polymerisation. Macromol. Mater. Eng. 287, 579–582 (2002).

22. *Errifai I. et al.* Elaboration of a fire retardant coating for polyamide-6 using cold plasma polymerization of a fluorinated acrylate // Surface and Coatings Technology. 2004. T. 180. P. 297…301.

23. *Tsafack M.J., Levalois-Grützmacher J.* Towards multifunctional surfaces using the plasma-induced graft-polymerization (PIGP) process: Flame and waterproof cotton textiles // Surface and coatings technology. 2007. T. 201. №. 12. P. 5789…5795.

24. *Yavuz H., Rzaev Z., Dilsiz N.* Characterisation of flame retardant plasma polymer deposited BOPP film // Plastics, rubber and composites. 2008. T. 37. №. 5-6. P. 268…275.

25. *Kamlangkla K., Hodak S. K., Levalois-Grützmacher J.* Multifunctional silk fabrics by means of the plasma induced graft polymerization (PIGP) process // Surface and Coatings Technology. 2011. T. 205. №. 13-14. P. 3755…3762.

26. *Faraq Z.R. et al.* Deposition of thick polymer or inorganic layers with flame-retardant properties by combination of plasma and spray processes // Surface and coatings technology. 2013. T. 228. P. 266…274.

27. *Nguyen Thi H. et al.* Application of plasma activation in flame-retardant treatment for cotton fabric // Polymers. 2020. T. 12. №. 7. P. 1575.

28. *Hilt F. et al.* Efficient flame-retardant thin films synthesized by atmospheric pressure PECVD through the high co-deposition rate of hexamethyldisiloxane and triethylphosphate on polycarbonate and polyamide-6 substrates // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. T. 8. №. 19. P. 12422…12433.

29. *Horrocks A.R. et al.* Surface modification of fabrics for improved flash-fire resistance using atmospheric pressure plasma in the presence of a functionalized clay and polysiloxane // Polymers for Advanced Technologies. 2011. T. 22. №. 1. P. 22…29.

30. *Carosio F., Alongi J., Frache A.* Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology, thermal stability and combustion behavior of PET fabrics // European Polymer Journal. 2011. T. 47. №. 5. P. 893…902.

31. *Radetić M.* Functionalization of textile materials with TiO2 nanoparticles // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 2013. T. 16. P. 62…76.

32. *Kiselev A.M., Rumyantsev E.V., Odintsova O.I., Rumyantseva V.E.* Modern technologies for obtaining textile materials with special properties and their fields of application // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. № 2(398). P. 121…133.

33. *Wanq H., Yan H., Fanq Z.* Fabrication and properties of PEI/APP layer-by-layer coated ramie fabric combined with low-temperature plasma treatment // Fire and Materials. 2022. T. 46. №. 1. P. 117…129.

34. *Horrocks A. R. et al.* Environmentally sustainable flame retardant surface treatments for textiles: The potential of a novel atmospheric plasma/UV laser technology // Fibers. 2018. T. 6. №. 2. P. 31.

Рекомендована кафедрой государственного надзора и экспертизы пожаров (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии. Поступила 01.04.25.