

В. А. Шабалов, М. С. Лисаневич, Ю. Н. Хакимуллин

**АНАЛИЗ ДОБАВОК ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛИПРОПИЛЕНА
ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ***Ключевые слова: добавки, радиационная стойкость, полипропилен, медицина, стабилизаторы, антиоксиданты.*

Изучение радиационной стойкости полипропилена имеет важное значение для применения в медицинских изделиях. Полипропилен часто подвергается стерилизации с использованием ионизирующего излучения, что может приводить к его деградации и снижению механических свойств. Это может негативно сказаться на безопасности и эффективности медицинских изделий, таких как хирургические инструменты и упаковка для стерильных материалов. Поэтому важно проводить выбор добавок, которые могут повысить радиационную стойкость и обеспечить надежность полимеров. Кроме того, необходимо проводить комплексные испытания для оценки долговечности и стабильности полимеров. Это включает в себя исследование влияния температуры, влажности и других факторов на эффективность добавок. Важно отметить, что комплексный подход к выбору добавок не только сохраняет физико-механические свойства полипропилена, но и повышает его надежность в условиях стерилизации медицинских изделий. В статье рассматривается классификация добавок для повышения радиационной стойкости полипропилена, подразделяемых по механизму действия: антиоксиданты, стабилизаторы, наноматериалы, компатибилизаторы и синергисты. В процессе анализа литературы выявлено, что наноматериалы и синергисты еще не до конца исследованы. Необходимо отметить, что комбинированное применение различных добавок таких, как стабилизаторы и антиоксиданты, может значительно улучшить радиационную стойкость полипропилена. Стабилизаторы замедляют окислительные процессы, а антиоксиданты предотвращают образование свободных радикалов, что критично для долговечности материалов. Дальнейшие исследования в области синергистов и наноматериалов для полипропилена могут привести к созданию более эффективных и безопасных материалов для медицинского применения. Это позволит не только улучшить качество медицинских изделий, но и расширить их функциональные возможности. Исследование радиационной стойкости и правильный выбор добавок являются ключевыми факторами для обеспечения безопасности пациентов и повышения эффективности лечения.

V. A. Shabalov, M. S. Lisanevich, Yu. N. Khakimullin

**ANALYSIS OF ADDITIVES FOR INCREASING THE RADIATION RESISTANCE
OF POLYPROPYLENE FOR MEDICAL DEVICES***Key words: additives, radiation resistance, polypropylene, medicine, stabilizers, antioxidants.*

The study of radiation resistance of polypropylene is important for its use in medical devices. Polypropylene is often sterilized using ionizing radiation, which can lead to its degradation and a decrease in mechanical properties. This can negatively affect the safety and effectiveness of medical devices, such as surgical instruments and packaging for sterile materials. Therefore, it is important to select additives that can increase radiation resistance and ensure the reliability of polymers. In addition, it is necessary to conduct comprehensive tests to assess the durability and stability of polymers. This includes a study of the effect of temperature, humidity and other factors on the effectiveness of additives. It is important to note that an integrated approach to the selection of additives not only preserves the physical and mechanical properties of polypropylene, but also increases its reliability under sterilization conditions of medical devices. The article discusses the classification of additives for increasing the radiation resistance of polypropylene, divided by the mechanism of action: antioxidants, stabilizers, nanomaterials, compatibilizers and synergists. In the process of literature analysis it was revealed that nanomaterials and synergists have not yet been fully studied. It should be noted that the combined use of various additives such as stabilizers and antioxidants can significantly improve the radiation resistance of polypropylene. Stabilizers slow down oxidation processes, and antioxidants prevent the formation of free radicals, which is critical for the durability of materials. Further research in the field of synergists and nanomaterials for polypropylene can lead to the creation of more effective and safe materials for medical use. This will not only improve the quality of medical products, but also expand their functionality. The study of radiation resistance and the correct choice of additives are key factors in ensuring patient safety and increasing the effectiveness of treatment.

Введение

В настоящее время полипропилен занимает одну из ключевых ниш среди термопластов, пользуясь спросом во всем мире и применяясь в множестве отраслей промышленности за счет своей доступности и универсальности [1-12]. Благодаря высокой прочности и устойчивости продукты из полипропилена становятся все более востребованными в области медицины и гигиены: для производства упаковки медицинских изделий, одноразовых медицинских изделий, нетканых материалов [13-15].

Все медицинские изделия в основном должны подвергаться радиационной стерилизации. Однако полипропилен при воздействии ионизирующего излучения подвергается разрушению, что приводит к уменьшению его молекулярной массы. В результате этого расплав становится более текучим, а свойства материала ухудшаются. Деструкция полипропилена после радиационной стерилизации, проявляется в значительном увеличении показателя текучести расплава, уменьшении предела текучести и относительного удлинения при разрыве, что связано с уменьшением молекулярной массы макромолекул в

результате разрыва основной цепи по третичному атому углерода. Например, в работе [16] ионизирующее излучение вызывает более интенсивную деструкцию ПП: облучение поглощенной дозой 45 кГр превосходит суммарное воздействие процессов термоокислительной деструкции при смешении и экструзии. Показатель текучести расплава (ПТР) ПП марки PP 1562R и увеличивается в 15 раз, а ПТР ПП марки PP H 350 FF/1 на 90%. Для ПП марки PP 1562R после воздействия ионизирующего излучения наблюдается уменьшение прочности при разрыве на 35-40 % в результате происходящих процессов деструкции полипропилена. Для ПП марки PP H350FF/1, для которого наблюдается деформация течения, прочность при разрыве не изменяется, но при этом наблюдается существенно снижение относительного удлинения при разрыве.

Полипропилен (ПП) в своем естественном состоянии (без добавок) по своей природе нестабилен и разрушается под воздействием кислорода. Полимеры меняют цвет на желто-коричневый и начинают отслаиваться, пока материал не станет бесполезным. Когда ПП разрушается, происходит разрыв цепи. Физические свойства полимера ухудшаются, и его средняя молекулярная масса (длина цепи) уменьшается, скорость течения расплава увеличивается, и в конечном итоге образуется порошкообразная поверхность. Разложение полимера — это естественное явление, которое невозможно полностью остановить.

Для повышения радиационной стойкости полипропилена необходимо применять добавки. Использование добавок способствует устойчивости к радиационному повреждению, улучшению термостабильности, снижению окислительной деградации, улучшению механических свойств, стабилизации цвета и прозрачности. Добавки необходимы для стабилизации полипропилена во время переработки расплава и защиты пластмасс от термоокислительной деградации в течение срока службы [17].

Поэтому исследование наиболее эффективных добавок для повышения радиационной стойкости полипропилена является актуальным.

Цель работы — на основании научно-технической литературы выявить максимально эффективные возможные добавки для увеличения радиационной стойкости композиции.

Методы исследования — анализ литературных источников, в которых исследуются добавки для увеличения радиационной стойкости полипропилена.

Добавки для увеличения радиационной стойкости полипропилена

На основе механизма действия можно выделить следующие группы добавок для увеличения радиационной стойкости полипропилена:

Стабилизаторы

Стабилизаторы — полимерные добавки, которые используются для увеличения долговечности полимеров. Они защищают полимер от разложения

под воздействием света, тепла или кислорода. Основные типы: UV — стабилизаторы, термические стабилизаторы, антиоксиданты.

К стабилизаторам относят:

1. Неорганические наночастицы оксидов металлов (поглощение/рассеяние излучения, захват радикалов, физический барьер)

2. Органические антиоксиданты и светостабилизаторы

- HALS (Hindered Amine Light Stabilizers) прерывают цепные реакции радикального окисления, захватывая свободные радикалы. Не поглощают УФ, но обеспечивают долговременную стабилизацию комбинаций наночастиц оксидов с органическими антиоксидантами (например, nano-ZnO + HALS)

- Фенольные антиоксиданты - доноры водорода для нейтрализации пероксильных радикалов.

- Фосфиты и фосфаты замедляют окислительные процессы и стабилизируют структуру полимера.

Наночастицы оксидов металлов (TiO₂, ZnO, MgO, ZrO₂ и др.) способны поглощать УФ- и электронное излучение, снижая энергию, поступающую в матрицу полимера, тем самым уменьшая образование свободных радикалов.

В работе [18] были проведены исследования оптических свойств в УФ, видимой и ИК областях спектра, а также радиационной стойкости на основе полипропилена, модифицированного наночастицами оксидных соединений (ZrO₂, Al₂O₃, SiO₂, MgO, TiO₂, ZnO). Спектры диффузного отражения регистрировались в условиях вакуума $2 \cdot 10^{-6}$ торр до и после электронного облучения ($E = 30$ кэВ, $F = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻²). Согласно результатам исследований, модификация полипропилена наночастицами оксидных соединений (ZrO₂, Al₂O₃, SiO₂, MgO, TiO₂, ZnO) приводит к образованию диффузионных спектров с ионами ионного излучения.

Исследование, изложенное в работе [19], посвящено исследованию оптических характеристик и радиационной устойчивости нанокомпозитов, созданных на основе полипропилена с добавлением наночастиц MgO твердотельным методом в концентрациях от 1 до 5 масс.%. Оптимальной концентрацией наночастиц MgO для повышения радиационной стойкости при облучении электронами с флюенсом $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² является концентрация 2 масс. % наночастиц MgO. При более высоких концентрациях наночастиц MgO в полипропилене наблюдается рост деградации стойкости к воздействию излучения.

В работе [20] изучены спектры диффузного отражения (в диапазоне 300–1000 нм) и интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения, а также их изменение после облучения электронами ($E = 30$ кэВ, $F = 2 \times 10^{16}$ см⁻²) полипропилена, модифицированного наночастицами оксида алюминия в диапазоне концентрации 1–5 масс. %. Определена оптимальная концентрация наночастиц (2 масс. %), при которой радиационная стойкость увеличивается в 9,5 раз.

В исследовании [21] полипропилен марки PPН030GP модифицируется наночастицами диоксида циркония ZrO₂. Благодаря этому

обеспечивается радиационная стойкость полипропилена. Образец устанавливают в вакуумной камере установки с источником электронов, камеру откачивают до давления $P \leq (1-5) \cdot 10^{-6}$ торр, регистрируют спектр отражения до облучения, облучают электронами с энергией 30 кэВ флюенсом $2 \cdot 10^{16}$ см⁻² при $T = 300\text{K}$, регистрируют спектр отражения после облучения, вычитают спектр отражения после облучения из спектра отражения до облучения, получают разностный спектр, по нему рассчитывают значение интегрального коэффициента поглощения — Δa_s . Оптимальной является концентрации наночастиц 1 масс.%. Значение Δa_s полипропилена, модифицированного наночастицами ZrO_2 в количестве 1 масс.% в 2,86 раза меньше по сравнению со значением Δa_s не модифицированного полипропилена.

В исследовании [22] светостабилизаторы на основе затрудненных аминов (HALS) и нано-ZnO использовались для стабилизации составов на основе полипропиленовой (ПП) пленки. Коэффициент пропускания УФ-излучения HALS почти не меняется с уровнем нагрузки, в то время как пропускание УФ-излучения материала нано-ZnO ниже на 39 %, чем у материалов HALS. Таким образом, чистый материал нано-ZnO обладает очень сильной способностью блокировать УФ-излучение из образцов полипропилена. С увеличением уровня нагрузки пропускание нано-ZnO в образцах полипропилена становится ниже на 17 %.

Многофункциональные гибридные добавки на основе наноматериалов

Наноматериалы — добавки, которые имеют структуру на наномасштабе (от 1 до 100 нанометров). Наноматериалы часто используются для улучшения механических, электрических и оптических свойств полимеров. Наноматериалы уменьшают окислительную деструкцию, предположительно могут быть использованы и для повышения радиационной стерилизации [23].

Одним из самых распространенных минеральных наполнителей для полимеров является диоксид кремния, который существенно улучшает их физико-механические характеристики и термостабильность. В работе [24] рассматривается влияние этого наполнителя на свойства полипропилена, предназначенного для медицинского использования. Добавление диоксида кремния способствует повышению устойчивости полимерной композиции к разрушению. В частности, использование SiO_2 в объеме 0,5 мас.ч. позволяет уменьшить прочностные характеристики на 36%.

Наночастицы оксидов существенно повышают радиационную стойкость ПП при оптимальных концентрациях (~1–2 масс. %). Превышение дозировок приводит к ухудшению свойств.

Комбинация органических светостабилизаторов (HALS) и неорганических наночастиц (ZnO) может обеспечить комплексную защиту от УФ и радиационного воздействия.

Для дальнейшего прогресса необходимы глубокие исследования механизмов взаимодействия на молекулярном уровне, оптимизация состава и

структуры нанокмпозитов, а также расширение спектра изучаемых условий эксплуатации [25].

В исследовании [26] композиты полипропилена (ПП) были изготовлены путем включения листов восстановленного оксида графена (RGO) и антиоксиданта пентаэритриттетра [β-(3, 5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенил)-пропионата] (AO1010) для сравнительного исследования влияния графена и антиоксиданта на радиационную стойкость. Включение антиоксиданта полезно для улучшенной дисперсии и отслаивания нанолayers RGO в матрице полипропилена. Температура плавления значительно снижается с увеличением дозы облучения, тогда как кристалличность остается практически неизменной для всех образцов до и после облучения. Механические характеристики и температура разложения композитов PP/AO1010/RGO при одновременном включении 0,5 мас.% AO1010 и 1,0 мас.% листов RGO выше, чем у композитов PP/AO1010 и PP/RGO при гамма-облучении в различных дозах. Добавление графен оксида в ПП значительно повышает радиационную стойкость за счет ловли свободных радикалов и усиления механических свойств.

Антиоксиданты

Антиоксиданты — добавки, которые защищают полимер от окисления. Антиоксиданты (АО) вводятся в ПП для замедления или предотвращения цепных реакций окисления, стабилизации структуры и продления срока службы материала. Фенольные антиоксиданты улавливают радикалы, предотвращая цепную деструкцию

Основные стадии окисления полипропилена:

1. Инициирование — образование макрорадикалов ($R\bullet$) при разрыве C–H или C–C связей под действием тепла, света или радиации.
2. Реакция с кислородом — образование пероксильных радикалов ($\text{ROO}\bullet$).
3. Рост цепи — пероксильные радикалы абстрагируют атомы водорода у соседних молекул, образуя гидропероксиды (ROOH) и новые радикалы.
4. Разложение гидропероксидов — образование новых радикалов, усиливающих деградацию.

В исследовании [27] для повышения устойчивости к стерилизации гамма-излучением полипропилена были разработаны рецептуры добавок, таких как антиоксиданты, сшивающий агент и оксид транс-стильбена (StO). Радиационная стойкость сополимеров этилена и пропиленов с содержанием этилена 3% была лучше, чем у гомополимеров полипропилена в случае отсутствия добавок.

В исследовании [28] изучалось влияние антиоксидантов и термической обработки на радиационную стойкость облученного гамма-лучами полипропилена. Полипропилен смешивали с различными антиоксидантами и изготавливали лист. Лист полипропилена облучали гамма-лучами в дозе 25 кГр в атмосфере азота. Исследовались различия как в цвете, так и в механической прочности облученного гамма-лучами полипропилена в зависимости от вида и содержания антиоксиданта. Полипропилен с фосфитным

антиоксидантом показал небольшую разницу в цвете после облучения гамма-лучами по сравнению с полипропиленом с фенольным или аминным антиоксидантом. Достаточное количество свободных радикалов можно было удалить из облученного гамма-лучами полипропилена путем термической обработки при 130 °С в течение 30 мин.

В исследовании [29] изучается влияние антиоксидантов на стойкость к облучению полипропилена, используемого в качестве изоляционных материалов для ядерных кабелей. Образцы, содержащие изотактический ПП (ИПП) и Irganox 1010 в концентрации 0,1 мас.%, облучаются гамма-лучами кобальта-60 в диапазоне доз от 0 до 250 кГр. Результаты показывают, что необлученные образцы с Irganox 1010 (П10) демонстрируют более мелкие ловушки, но такие образцы демонстрируют улучшенную стойкость к облучению с увеличением дозы. По сравнению с образцами ПП, образцы П10 демонстрируют ослабленное окисление, незначительное снижение температуры плавления, более глубокие ловушки носителей заряда и более высокую прочность на пробой переменного тока после облучения. Однако положительное влияние Irganox 1010 на ПП становится менее выраженным с увеличением дозы облучения.

В исследовании [30] при добавлении в полипропилен 0,5 частей антиоксиданта 1076, стойкость к облучению лучше, чем у чистого полипропилена. Желтизна каждого образца находится в пределах 2 при разной дозе облучения, то есть почти нет цвета. В целом, антиоксидант 1076 на стойкости ПП к облучению активнее. Антиоксидант 1076 является разновидностью типичных алкилфенольных антиоксидантов и является незаменимой добавкой для синтетического каучука, пластика, резины и масла, его молекулы содержат длинноцепочечный алкил и подходят для использования при высокой температуре. Антиоксидант 1076 может устранять свободные радикалы кислорода, которые образуются в полипропилене посредством облучения, предотвращая образование перекиси водорода. Необходимо отметить, что с увеличением дозы облучения прочность на разрыв материала полипропилена и ударная вязкость снижается.

В исследовании [31] хранение медицинских одноразовых изделий, изготовленных из изотактического полипропилена после облучения делает их хрупкими из-за деградации. Чтобы избежать этого, изотактический полипропилен был смешан с мобилизатором: диоктилфталлатом, тремя антиоксидантами (затрудненными аминами и вторичным антиоксидантом) и бензойной кислотой для получения радиационно-стойкого, термостабильного и прозрачного материала. Приготовленные составы были подвергнуты гамма-излучению в дозах 25 и 50 кГр. Испытания на разрыв при изгибе после старения в печи при 70 °С в течение 12 месяцев показали, что добавление диоктилфталлата и антиоксидантов придает улучшенную радиационную и термическую стабильность.

В работе [32] исследовалось влияние добавки бисфенол-5 (БФ-5) на свойства полипропилена после ионизирующего излучения. В результате было выявлено, что введение фенольного антиоксиданта (бисфенол-5) приводит к увеличению стойкости к деструкции полимерной композиции. Введение БФ-5 в количестве 0,3% при облучении поглощенной дозой 73 кГр позволяет снизить ПТР на 97%. Увеличение введения БФ-5 до количества 0,5% также при облучении поглощенной дозой 73 кГр позволяет снизить ПТР 98% (4,9 раз).

Исследование [33] показало, что добавление фенольных и фенол-фосфитных антиоксидантов снижает радиационную деструкцию полипропилена. При этом, наиболее эффективным оказалось применение фенол-фосфитного антиоксиданта Апох ВВ021 в концентрации 0,3 мас.ч. При поглощенной дозе 60 кГр, его использование приводит к более низким (на ~44% ниже, по сравнению с ПП без добавок) значениям ПТР. При добавлении Апох 20 в количестве 0,3 мас.ч. снижение ПТР составляет 38%.

В исследовании [34] была проанализирована реакция композиций на основе блоксополимера пропилена и этилена на воздействие гамма-излучения, с учетом добавления фенольных и фенол-фосфитных антиоксидантов. Самые высокие показатели эффективности в отношении снижения разрушения сополимера продемонстрировали Бисфенол – 5 и смешанный антиоксидант фенол-фосфитного типа Апох ВВ021. Применение Апох ВВ021 при поглощенной дозе 60 кГр приводит к более низким (в ~3 раза ниже, по сравнению с исходным блоксополимером пропилена и этилена) значениям ПТР. При добавлении Апох 20 ПТР снижается в 2,2 раза. После воздействия гамма-излучения, ПТР композиции на основе сополимера с добавлением антиоксидантов (бисфенол–2 и бисфенол–5) существенно ниже (при дозе 60 кГр в три раза), чем у сополимера без добавок. Для дальнейшего прогресса необходим комплексный подход, сочетающий молекулярный анализ механизмов стабилизации, оптимизацию рецептур и разработку новых методов обработки материалов.

Компатибилизаторы

Для повышения стабильности ПП применяются антиоксиданты и стабилизаторы, однако важным направлением является использование компатибилизаторов — добавок, улучшающих межфазное взаимодействие в композитах и препятствующих радиационному разрушению полимерной матрицы. Их применяют для образования прочных связей на границе раздела полимер-наполнитель. Компатибилизаторы улучшают адгезию на границе раздела фаз, снижая концентрацию напряжений и замедляя микротрещинообразование.

В работе [35] было обнаружено, что компатибилизаторы, такие как гидрогенизированный бутадиено-стирольный (10 мол.%) каучук (КПБ-2) и этилен-пропиленовый каучук, привитый малеиновым ангидридом, значительно замедляют деградацию полипропилена. Концентрация компатибилизатора,

необходимая для повышения радиационной стойкости ПП, зависит от радиационной стойкости до добавления компатибилизатора. Плохо стойкий к радиации ПП с более низкой молекулярной массой (индекс текучести расплава 10) требовал более высокой концентрации, более 10% КПБ-2 для придания радиационной стойкости. ПП с высокой молекулярной массой (индекс текучести расплава 1,0) и сополимер пропилена (КП) с содержанием этилена 2,5% требовали КПБ-2 в концентрации 5% и 10% для придания достаточной радиационной стойкости.

В исследовании [36] было оценено влияние добавления компатибилизатора в матрицу полипропилена на межфазную адгезию между углеродным волокном (УВ) и матрицей ПП. Необлученные и облученные полипропилен были смешаны, и два типа углеродных волокон: неразмерные (поверхностно обработанные) и размерные, были использованы для приготовления композитов. Было обнаружено, что значения прочности на разрыв увеличились до 30%.

В работе [37] полипропиленовые композиты, армированные короткими стеклянными волокнами, были изготовлены путем смешивания в расплаве. В композиты был добавлен полипропилен, привитый малеиновым ангидридом (PP - g -MA). Результаты показали улучшение взаимодействия стекловолокно/матрица при добавлении компатибилизатора, что привело к повышению общей жесткости материала и способности матрицы накапливать энергию. В частности, снижение стеклования и исследование поверхностей разрушения композитов подтвердили улучшенную адгезию. Включение 10 мас.% стекловолокна в матрицу без добавления компатибилизатора значительно снизило кристалличность с 62,1 до 55,5% и повысило температуру кристаллизации с 97,1 до 101,6 °C, что свидетельствует о гетерогенном зародышеобразовании. Модуль упругости увеличился с 194 до 481 МПа.

Механизмы действия компатибилизаторов при радиационном облучении изучены недостаточно — нет подробного понимания влияния на кинетику радикальных процессов и структурные изменения. Оптимизация концентраций компатибилизаторов для разных типов ПП и наполнителей требует систематического изучения с учётом молекулярной массы и состава сополимеров. Взаимодействие компатибилизаторов с антиоксидантами и синергистами мало изучено — необходимо исследовать комплексные системы стабилизации. Влияние компатибилизаторов на морфологию, кристалличность и механические свойства при радиационном старении требует детального анализа.

Параллельно развивается направление использования синергистов — комплексов стабилизирующих составов, сочетающих антиоксиданты разного типа для усиления эффекта.

Синергисты

Синергисты — добавки, которые являются комбинациями стабилизаторов и антиоксидантов.

Синергисты могут действовать совместно с антиоксидантами, увеличивая их эффективность. Например, один компонент может усиливать действие другого за счет улучшения его стабильности или увеличения его способности к захвату свободных радикалов.

В работе [38] изучалась эффективность повышения радиационной стойкости полипропилена с помощью фосфоорганических стабилизаторов. Исследования показали, что добавление смесевых стабилизирующих составов на базе фосфорорганических соединений существенно улучшает характеристики радиационностойкого полипропилена. В частности, композиции, содержащие 2,4-ди (трет-бутилфениловый эфир) пентаэритритдифосфорной кислоты и фосфорорганический стабилизатор на основе стерически затруднённого фенола, демонстрируют наилучшие показатели стойкости полипропилена к разрушительным процессам при различных уровнях поглощенного ионизирующего излучения.

Также применение смесевых стабилизирующих композиций на основе фенольных и фосфорорганических стабилизаторов на радиационную стойкость полипропилена было изучено в работе [39].

Общая классификация добавок по механизму действия обобщена в таблице 1.

Анализируя данные таблицы, выявлено, что добавки для увеличения радиационной стойкости полипропилена можно разделить на несколько ключевых групп (стабилизаторы, наноматериалы, антиоксиданты, компатибилизаторы, синергисты), каждая из которых выполняет свою функцию по защите материала от ионизирующего излучения. Необходимо отметить, когда стабилизаторы и антиоксиданты применяются вместе в полипропилене, они могут выполнять одновременно две функции, обеспечивая как защиту от окисления, так и улучшение стабильности и прочности.

Радиационная стойкость полипропилена является важной характеристикой, которая влияет на его применение в ключевых отраслях, в том числе и в медицине [40-52]. На основании проведенного обзора можно сделать выводы о том, что синергисты и наноматериалы для повышения радиационной стойкости полипропилена не до конца изучены. Не найдены работы, где исследуются влияние таких наноматериалов, как диоксид титана и оксид цинка на радиационную стойкость полипропилена. Для дальнейшего прогресса необходимы глубокие исследования механизмов взаимодействия на молекулярном уровне, оптимизация состава и структуры нанокомпозитов и компатибилизаторов, где нет подробного понимания влияния на кинетику радикальных процессов и структурные изменения. Необходимо отметить, что использование комбинации различных добавок может значительно повысить радиационную стойкость полипропилена.

Таблица 1 – Классификация добавок

Table 1 – Classification of additives

Название группы	Наименование добавки	Значение
Стабилизаторы	оксидные соединения (ZrO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiO_2 , ZnO)	Устойчивые к радиации соединения, помогают сохранить механические свойства полипропилена
Наноматериалы	диоксид кремния, диоксид титана, оксид цинка	Улучшают стойкость к радиации полипропилена за счет барьерного эффекта
Антиоксиданты	Фосфиты, трифосфаты: бисфенол-5 фенольный и фенол-фосфитный антиоксиданты, бутилгидроксанизол, бутилгидрокситолуол, трифенилфосфин, фенольные и фенол-фосфитные антиоксиданты, сшивающий агент и оксид транс-стильбена (StO) антиоксидант пентаэритриттер [β -(3, 5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенил)-пропионат] (АО1010), хиноидные соединения, например, полихинон	Помогают предотвратить окислительное разложение полипропилена под действием радиации
Компатобилизаторы или полимерные модификаторы	гидрогенизированный стирольный (10 мол. %)/бутадиеновый каучук (КПБ-2) и этилен/пропиленовый каучук, привитый малеиновым ангидридом	Повышают прочностные характеристики, общую стойкость к радиации
Синергисты	2,4-ди(трет-бутилфениловый эфир) пентаэритритдифосфористая кислота и фосфорорганический стабилизатор на основе стерически-затрудненного фенола	Комбинации стабилизаторов и антиоксидантов защищают материал от деструкции, вызванной воздействием ионизирующего излучения, тем самым увеличивая его долговечность и сохранность свойств в процессе стерилизации. Когда эти два типа соединений используются вместе в полимерных материалах, они могут дополнять друг друга, обеспечивая как защиту от окисления, так и улучшение стабильности и прочности. Это может привести к созданию более устойчивых и долговечных материалов

Например, сочетание антиоксидантов и стабилизаторов (синергистов) может обеспечить более эффективную защиту от радиационного воздействия. Перспективные направления исследований включают разработку новых синтетических добавок и изучение их взаимодействия с полипропиленом для достижения максимальной эффективности. Важно также уделить внимание экологическим аспектам, исследуя природные и биосовместимые добавки, что обеспечит уменьшить вредное воздействие на окружающую среду. Использование добавок для повышения стойкости откроет новые горизонты для использования полипропилена в условиях радиационного воздействия, обеспечивая безопасность и надежность медицинских изделий.

Литература

1. М.М. Михайлов, В.А. Горончко, *Космические аппараты и технологии*, **40**, 2, 102–107 (2022).
2. Е.Н. Крючков, Н.Н. Дебелова, Е.Н. Завьялова, П.Б. Завьялов, *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, **30**, 1, 151–155 (2011).
3. М.Б. Пермяков, А.М. Пермякова, *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*, **2**, 1 43–46 (2015).
4. М. Д. Орлова, М.А. Мнушкин, И.С. Евтушенко, *Исследование различных направлений современной науки*. М., Ч. 2., 2017. С. 562–567.
5. Л.А. Опарина, Е.И. Кукушкина, *Экологические аспекты современных городов*. Иваново, 2023. С. 60–62.

6. Р.С. Сабитов, С.В. Дезорецев, М.Ю. Долматов, *Современные проблемы истории естествознания в области химии, химической технологии и нефтяного дела*. Уфа, 2013. С. 85–86.
7. А.А. Руденко, В.П. Дорожкин, Д.В. Ярылгин, *Молодой ученый*, **136**, 2, 32–37 (2017).
8. С. Ю. Кубылькина, А.А. Беликова, Е.С. Чернова, И.М. Тарасова, *Проблемы и перспективы развития экспериментальной науки*. Новосибирск, Т. 2., Ч. 2., 2019. С. 48–50.
9. Н.П. Пророкова, *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTX)*, **1**, 1, 161–166 (2021).
10. А.Г. Филинук. *Кузбасс: образование, наука, инновации*, Кемерово, 2022. С. 174 – 177.
11. А.Г. Филинук. *Россия и мир в новых реалиях: изменение мирохозяйственных связей*. Екатеринбург, Т.3, 2022. С. 98–101.
12. Л.М. Колбина, С.Л. Воробьева, Н.А. Санникова, С.Н. Непейвода, *Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии*, **1**, 1, 128–130 (2016).
13. R.J Rolando, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, **9**, 4, 326–333 (1993).
14. Г.Ш. Музафарова, Э.М. Саматова, Р.Г. Ибрагимов, И.Ш. Абдуллин. *Наука, образование, общество: тенденции и перспективы*. Ч.5., Москва, 2014. С. 72–73.
15. Э.Р. Рахматуллина, М.С. Лисаневич, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин. *ИНЭОС Open Select*, **1**, 1, 271–274 (2019).
16. Рахматуллина Э.Р. Дисс. канд. техн. наук., ФГБОУ ВО КНИТУ, Казань, 2019. 157 с.
17. Antioxidants Stabilizers Selection for Polyolefins (PP, PE). – URL: <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/antioxidants-stabilizers-selection-for-polyolefins-pp-pe> (дата обращения 29.03.2025).
18. М. М. Mikhailov, A. Vladimir, A. Goronchko, N. Lapin, A. Semyon, A. Yuryev, *Polymer*, **1**, 296, 1–4 (2024).
19. М.М. Михайлов, В.А. Горончко, *Космические аппараты и технологии*, **40**, 20, 102–107 (2022).
20. М.М. Михайлов, В.А. Горончко, С.М. Лебедев, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **1**, 7, 14–18 (2021).
21. RU 2 767 524 C1, 2017.
22. W. Brostow, X. Lu, O. Gencel, AT Osmanson, *Materials (Basel)*, **7**, 13, 1626 (2020).
23. Yu Lin, Yaohua Liu, Guozhang Wu, Dongge Zhang, *Composites Science and Technology*, **1**, 146, 1–20 (2017).
24. А.Г. Шарипов, Э.Р. Рахматуллина, М.С. Лисаневич *European reserch*. Ч. 2., Пенза, 2020. С. 27–29.
25. Pieter Gijsman, Rudinei Fiorio, *Polymer Degradation and Stability*, **1**, 208, 1–20 (2023).
26. L. Yaohua, Z. Dongge, W. Guozhang, *Composites Science and Technology*, **1**, 1, 146–148 (2017).
27. G Khang, HB Lee, JB Park, *Biomed Mater Eng*, **5**, 6, 323–324 (1996).
28. S. H. Park, P. H. Hyung-II Kim, P.H. Kang, Y.C. Nho, *Polymer Korea*, **1**, 30, 10–13 (2006).
29. B. Liu, Y. Gao, D. Lu, C. Guo, B. Si and B. Du, *IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD)*, **1**, 1, 1–4 (2024).
30. H. Wangtong, D. Xuejia, C. Ruilong, D. Juping, *AASCT Journal of Materials*, **2**, 4, 20–30 (2001).
31. A. Shamshad., A.A. Basfar, *Radiation Physics and Chemistry*, **57**, 1, 447–450 (2000).
32. Э.Р. Рахматуллина, М.С. Лисаневич, Р.Ю. Галимзянова, А.И. Шамбазова. *Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации*. Пенза, Ч.1., 2018. С. 25–27.
33. М.С. Лисаневич, Р.Ю. Галимзянова, Н.А. Мукменева, Ю.Н. Хакимуллин, Э.Р. Рахматуллина, Е.С. Кузнецова, А.Н. Рамазанова, *Вестник Казанского технологического университета*, **1**, 2, 181–182 (2015).
34. М.С. Лисаневич, Р.Ю. Галимзянова, Н.А. Мукменева, *Вестник Технологического университета*, **21**, 10, 100–103 (2018).
35. F. Yoshii, A. Sudradjat, D. Binh, K. Makuuchi, *Polymer Degradation and Stability*, **60**, 1, 393–399 (1998).
36. G. K. Nevin, A. Ayse, A. Meshude, D. Veli, G. Olgun, *Radiation Physics and Chemistry*, **84**, 1, 74–78 (2013).
37. E. Delli, D. Gkiliopoulos, E. Vouvoudi, D. Bikiaris, K. Chrissafis, *J. Compos. Sci.*, **1**, 8, 44 (2024).
38. Э.Р. Рахматуллина, Р.Ю. Галимзянова, Ю.Н. Хакимуллин, *XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тезисы докладов в пяти томах*, Екатеринбург, 2016. С. 357.
39. Э.Р. Рахматуллина, Р.Ю. Галимзянова, М.С. Лисаневич М. С., Е.С. Кузнецова, Ю.Н. Хакимуллин, Н.А. Мукменева, *Вестник Казанского технологического университета*, **1**, 22, 181–183 (2013).
40. А. Н. Федорчук, А. В. Лисин, А. И. Ахмедова [и др.], *Вестник Технологического университета*, **21**, 1, 75–77 (2018).
41. М. Ю. Гвоздев, *Журнал акушерства и женских болезней*, **62**, 2, 43–50 (2013).
42. RU 45914 U1, 2005.
43. RU 204802 U1, 2021.
44. RU 216507 U1, 2022.
45. RU № 21939, 2015.
46. RU 78075 U1, 2008.
47. RU 180205 U1, 2017.
48. RU 2825770 C1, 2024.
49. М. С. Лисаневич, Р. Ю. Галимзянова, *Бутлеровские сообщения*, **64**, 11, 149–153 (2020).
50. Л. И. Гарифуллина, Н. И. Ли, Р. М. Гарипов, А. К. Миннахметова, *Вестник Технологического университета*, **22**, 1, 47–53 (2019).
51. А. Н. Рамазанова, Е. С. Кузнецова, М. С. Лисаневич [и др.], *Развитие науки и образования в современном мире*, Ч. IV. Москва. С. 16–17.
52. А.Ю. Ватютова, *Наука. Наследие. Университет*, Чебоксары, 2022. С. 357–360.

References

1. М.М. Mikhailov, V.A. Goronchko, *Spacecraft and Technologies*, **40**, 2, 102–107 (2022).
2. E.N. Kryuchkov, N.N. Debelova, E.N. Zavyalova, P.B. Zavyalov, *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, **30**, 1, 151–155 (2011).
3. M.B. Permyakov, A.M. Permyakova, *Current Problems of Modern Science, Technology and Education*, **2**, 1 43–46 (2015).
4. M.D. Orlova, M.A. Mnushkin, I.S. Evtushenko, *Research into various areas of modern science*. Moscow, Part 2, 2017. pp. 562–567.
5. L.A. Oparina, E.I. Kukushkina, *Environmental aspects of modern cities*. Ivanovo, 2023. pp. 60–62.
6. R.S. Sabitov, S.V. Dezoretsev, M.Yu. Dolmatov, *Contemporary Problems of the History of Natural Science in the Field of Chemistry, Chemical Technology, and Oil Industry*. Ufa, 2013. pp. 85–86.
7. A.A. Rudenko, V.P. Dorozhkin, D.V. Yarylgyn, *Young Scientist*, **136**, 2, 32–37 (2017).
8. C. Yu. Kubylkina, A.A. Belikova, E.S. Chernova, I.M. Tarasova, *Problems and Prospects for the Development of Experimental Science*. Novosibirsk, Vol. 2, Part 2, 2019. pp. 48–50.

9. N.P. Prorokova, Physics of Fibrous Materials: Structure, Properties, Science-Intensive Technologies and Materials (SMARTEX), **1**, 1, 161–166 (2021).
10. A.G. Filinyuk. Kuzbass: Education, Science, Innovation, Kemerovo, 2022. Pp. 174–177.
11. A.G. Filinyuk. Russia and the world in the new reality: changes in global economic relations. Yekaterinburg, Vol. 3, 2022. Pp. 98–101.
12. L.M. Kolbina, S.L. Vorobyova, N.A. Sannikova, S.N. Nepeyvoda, Issues of Regulatory and Legal Regulation in Veterinary Medicine, **1**, 1, 128–130 (2016).
13. RJ Rolando, Journal of Plastic Film & Sheeting, **9**, 4, 326–333 (1993).
14. G.Sh. Muzafarova, E.M. Samatova, R.G. Ibragimov, I.Sh. Abdullin. Science, education, society: trends and prospects. Part 5, Moscow, 2014. pp. 72–73.
15. E.R. Rakhmatullina, M.S. Lisanevich, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin. INEOS Open Select, **1**, 1, 271–274 (2019).
16. Rakhmatullina E.R. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kazan National Research Technical University, Kazan, 2019. 157 pp.
17. Antioxidants Stabilizers Selection for Polyolefins (PP, PE). – URL: <https://polymer-additives.specialchem.com/selection-guide/antioxidants-stabilizers-selection-for-polyolefins-pp-pe> (accessed on 29.03.2025).
18. M. M. Mikhailov, A. Vladimir, A. Goronchko, N. Lapin, A. Semyon, A. Yuryev, Polymer, **1**, 296, 1–4 (2024).
19. M.M. Mikhailov, V.A. Goronchko, Spacecraft and Technologies, **40**, 20, 102–107 (2022).
20. M.M. Mikhailov, V.A. Goronchko, S.M. Lebedev, Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies, **1**, 7, 14–18 (2021).
21. RU 2 767 524 C1, 2017.
22. W. Brostow, X. Lu, O. Gencel, AT Osmanson, Materials (Basel), **7**, 13, 1626 (2020).
23. Yu Lin, Yaohua Liu, Guozhang Wu, Dongge Zhang, Composites Science and Technology, **1**, 146, 1–20 (2017).
24. A.G. Sharipov, E.R. Rakhmatullina, M.S. Lisanevich European research. Part 2., Penza, 2020. P. 27–29.
25. Pieter Gijsman, Rudinei Fiorio, Polymer Degradation and Stability, **1**, 208, 1–20 (2023).
26. L. Yaohua, Z. Dongge, Wu. Guozhang, Composites Science and Technology, **1**, 1, 146–148 (2017).
27. G Khang, HB Lee, JB Park, Biomed Mater Eng, **5**, 6, 323–324 (1996).
28. S. H. Park, P. H. Hyung-Il Kim, P.H. Kang, Y.C. Nho, Polymer Korea, **1**, 30, 10–13 (2006).
29. B. Liu, Y. Gao, D. Lu, C. Guo, B. Si and B. Du, IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD), **1**, 1, 1–4 (2024)
30. H. Wangtong, D. Xuejia, C. Ruilong, D. Juping, AASCIT Journal of Materials, **2**, 4, 20–30 (2001).
31. A. Shamshad., A.A. Basfar, Radiation Physics and Chemistry, **57**, 1, 447–450 (2000).
32. E.R. Rakhmatullina, M.S. Lisanevich, R.Yu. Galimzyanova, A.I. Shambazova. Modern Science: Current Issues, Achievements, and Innovations. Penza, Part 1, 2018. pp. 25–27.
33. M.S. Lisanevich, R.Yu. Galimzyanova, N.A. Mukmeneva, Yu.N. Khakimullin, E.R. Rakhmatullina, E.S. Kuznetsova, A.N. Ramazanov, Herald of Technological University, **1**, 2, 181–182 (2015).
34. M.S. Lisanevich, R.Yu. Galimzyanova, N.A. Mukmeneva, Herald of Technological University, **21**, 10, 100–103 (2018).
35. F. Yoshii, A. Sudradjat, D. Binh, K. Makuuchi, Polymer Degradation and Stability, **60**, 1, 393–399 (1998).
36. G. K. Nevin, A. Ayse, A. Meshude, D. Veli, G. Olgun, Radiation Physics and Chemistry, **84**, 1, 74–78 (2013).
37. E. Delli, D. Gkiliopoulos, E. Vouvoudi, D. Bikiaris, K. Chrissafis, J. Compos. Sci., **1**, 8, 44 (2024).
38. E.R. Rakhmatullina, R.Yu. Galimzyanova, Yu.N. Khakimullin, XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: abstracts of reports in five volumes, Yekaterinburg, 2016. P. 357.
39. E.R. Rakhmatullina, R.Yu. Galimzyanova, M.S. Lisanevich M. S., E.S. Kuznetsova, Yu.N. Khakimullin, N.A. Mukmeneva, Herald of Kazan Technological University, **1**, 22, 181–183 (2013).
40. A. N. Fedorchuk, A. V. Lisin, A. I. Akhmedova [et al.], Herald of Technological University, **21**, 1, 75–77 (2018).
41. M. Yu. Gvozdev, Journal of Obstetrics and Gynecology, **62**, 2, 43–50 (2013).
42. RU 45914 U1, 2005.
43. RU 204802 U1, 2021.
44. RU 216507 U1, 2022.
45. RU No. 21939, 2015.
46. RU 78075 U1, 2008.
47. RU 180205 U1, 2017.
48. RU 2825770 C1, 2024.
49. M. S. Lisanevich, R. Yu. Galimzyanova, Butlerovskie Сообщения, **64**, 11, 149–153 (2020).
50. L. I. Garifullina, N. I. Li, R. M. Garipov, A. K. Minnakhmeteva, Herald of Technological University, **22**, 1, 47–53 (2019).
51. A. N. Ramazanov, E. S. Kuznetsova, M. S. Lisanevich [et al.], Development of Science and Education in the Modern World, Part IV. Moscow. pp. 16–17.
52. A. Yu. Vatyutova, Science. Heritage. University, Cheboksary, 2022. pp. 357–360.

© **В. А. Шабалов** - аспирант 1 курса по специальности 2.6.11 Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, shabalov10@icloud.com; **М. С. Лисаневич** – кандидат технических наук, доцент кафедры Медицинской инженерии, КНИТУ, lisanevichms@gmail.com; **Ю. Н. Хакимуллин** – доктор технических наук, профессор кафедры Химии и технологии переработки эластомеров, КНИТУ, KhakimullinYuN@corp.knrtu.ru.

© **V. A. Shabalov** – 1st year postgraduate Student in specialty 2.6.11 Technology and processing of synthetic and natural polymers and composites, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, shabalov10@icloud.com; **M. S. Lisanevich** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Medical Engineering, KNRTU, lisanevichms@gmail.com; **Yu. N. Khakimullin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing, KNRTU, KhakimullinYuN@corp.knrtu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.