

Радиационная и пероксидная сшивка композитов на основе полипропилена: обзор и сравнительный анализ

Арайлым Турсынова¹, Лязат Толымбекова¹, Гайни Сейтенова^{1*}, Гаухар Тажкенова¹,
Зарина Елемесова¹

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; tursynova_ak@enu.kz, tolymbekova_lb@enu.kz, seitenova_gzh@enu.kz, gaukhar-1970@mail.ru, yelemessova_zs@enu.kz

*Корреспонденция: seitenova_gzh@enu.kz

Цитирование: Турсынова, А. Толымбекова, А., Сейтенова, Г., Тажкенова, Г., Елемесова, З. (2025). Радиационная и пероксидная сшивка композитов на основе полипропилена: обзор и сравнительный анализ. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия «Химия. География. Экология». 151(2), 103-129. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-151-2-103-129>

Академический редактор:
Э.Е. Копишев

Поступила: 18.04.2025
Исправлена: 25.06.2025
Принята: 25.06.2025
Опубликована: 30.06.2025



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Аннотация: В данной статье представлен комплексный обзор и сравнительный анализ двух ключевых методов модификации полипропиленовых композитов - радиационной и пероксидной сшивки. Полипропилен, обладая высокими физико-химическими характеристиками, широко применяется в строительной, автомобильной, электротехнической и других отраслях. Однако необходимость повышения его термостойкости, прочности и долговечности требует дополнительной модификации макромолекулярной структуры. Рассматриваемые методы сшивки обеспечивают формирование пространственно-сшитой структуры, что значительно улучшает эксплуатационные свойства материала. В статье проанализированы механизмы образования сетчатой структуры, влияние параметров процесса на эффективность сшивки, а также приведено сравнение полученных композитов по ряду физико-механических и термических характеристик. Обоснована актуальность выбора метода в зависимости от специфики конечного применения, что подчеркивает перспективность дальнейших исследований в области полимерной инженерии. Рассматриваются потенциальные области применения модифицированных композитов, включая их использование в высокотехнологичных отраслях, где требуются повышенные характеристики прочности и устойчивости к воздействию окружающей среды. Кроме того, освещаются экологические и экономические аспекты внедрения сшитых полипропиленов в промышленность. Особое внимание уделено вопросам масштабирования технологий, а также интеграции полученных решений в существующие производственные процессы. В то же время анализируются трудности, связанные с контролем степени сшивки и необходимостью стандартизации получаемых материалов. В заключение подчеркивается важность выбора оптимального метода сшивки для достижения желаемых свойств полипропиленовых композитов, что может существенно повлиять на их конкурентоспособность на рынке. Приведены примеры успешной реализации данных технологий в промышленном производстве.

Ключевые слова: полипропилен, сшивка полимеров, радиационная сшивка, пероксидная сшивка, композиты, полимерные материалы, физико-химические свойства, модификация полимеров, структурные изменения, промышленные применения.

Введение

Полипропилен (ПП) - один из наиболее широко применяемых термопластов, отличающийся хорошими механическими характеристиками, химической инертностью и доступной стоимостью. Однако при всех его достоинствах данный материал имеет ограниченную термическую стабильность и сниженную прочность при повышенных температурах. Для преодоления этих недостатков и расширения сфер использования ПП активно исследуются методы модификации, в частности, формирование сшитой структуры, позволяющей значительно улучшить эксплуатационные качества материала (Czakaj, J., 2024; Alsabri, A., 2023; Uyor U. O., 2023; Han, I.S., 2023; Banu, R.D., 2024). Схематическое изображение различий в структуре линейного, разветвлённого и сшитого полимеров представлено на рисунке 1.

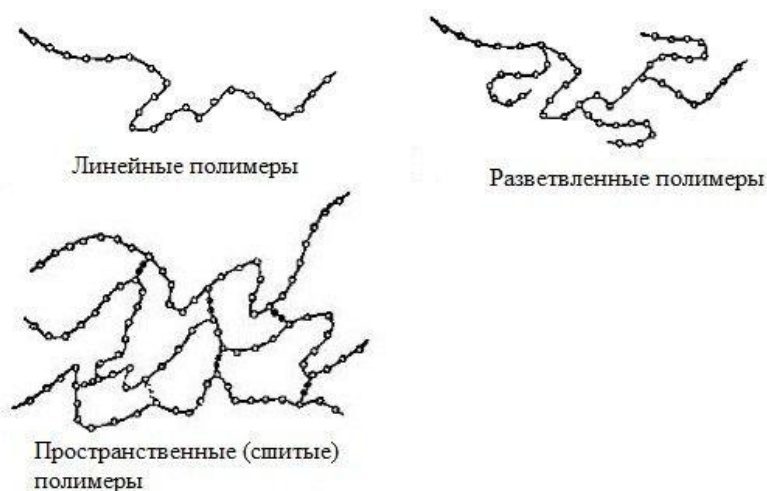


Рисунок 1. Различия между линейным, разветвленным и сшитым полимером (Иллюстрация на основе общепринятых моделей молекулярных структур полимеров)

Процесс создания пространственно-связанных макромолекулярных сетей, или сшивка, обеспечивает повышение жесткости, устойчивости к температурным и механическим нагрузкам. Среди применяемых подходов особое внимание уделяется радиационной и пероксидной модификации как наиболее эффективным и часто используемым в практике (Han, I.S., 2023; Ivanov, I.I. 2023; Fomicheva, T.A., 2023).

Радиационный метод основан на использовании ионизирующего излучения - гамма-квантов или электронных пучков - для инициирования процессов, формирующих сетчатую структуру в полимерной матрице. Данный способ обеспечивает точный контроль и может быть адаптирован как для чистых полимеров, так и для их наполненных форм (Lenfeld, P., et al., 2020).

Пероксидный путь включает использование органических инициаторов, которые при нагревании разлагаются с образованием активных радикалов, способствующих сшиванию. Этот метод также позволяет значительно улучшить физико-механические параметры, однако требует тщательного контроля условий протекания реакции (Pzybysz, M., et al., 2019).

Настоящая статья представляет обобщённый анализ современных исследований в области радиационной и пероксидной модификации композитов на основе полипропилена.

Проведено сравнение (таблица 1) указанных методов, раскрыты их механизмы, особенности, достоинства и ограничения (Han et al., 2023).

Таблица 1. Сравнение пероксидной и радиационной сшивки полиэтилена

№ п/п	Параметр	Пероксидная сшивка	Радиационная сшивка
1	Принцип	Термическое разложение органического пероксида с образованием свободных радикалов	Облучение высокоэнергетическими частицами (γ -лучи, β -лучи, электроны)
2	Температура процесса	Высокая (130–450 °C, часто >300 °C)	Около 20–80 °C (почти комнатная)
3	Среда проведения	Инертная атмосфера (обычно азот)	Воздух, азот или вакуум
4	Оборудование	Вулканизационные трубы, экструдеры	Установки радиационной обработки (электронные ускорители, источники γ -излучения)
5	Глубина сшивки	Зависит от времени выдержки и распределения температуры	Равномерная по толщине, но зависит от плотности материала и энергии излучения
6	Контроль степени сшивки	Через технологические параметры, математические модели	Труднее точно контролировать; зависит от дозы и времени облучения
7	Экологические и технологические аспекты	Используются химические агенты, возможны остатки пероксида	Без использования химикатов, но требует защиты от радиации
8	Оборудование и эксплуатационные затраты	Сравнительно дешевле, но требует энергозатрат на нагрев	Дорогая установка, но энергозатраты ниже
9	Применимость к различным изделиям	Лучше для толстостенных и крупных изделий	Эффективна для тонкостенных изделий и пленок
10	Реологические и механические свойства	Можно точно регулировать с помощью рецептуры	Зависит от равномерности облучения и дозы
11	Скорость процесса	Быстрое протекание сшивки при высоких температурах	Относительно медленное

Особое внимание уделено влиянию различных факторов на эффективность сеткообразования и эксплуатационные качества полученных материалов. Такой подход позволяет глубже понять перспективы каждого метода и обосновать выбор конкретной технологии в зависимости от поставленных задач.

Результаты анализа демонстрируют, что оба метода способны существенно повысить термостойкость, прочность и химическую стабильность полипропиленовых систем. Эти качества особенно востребованы при создании изделий для технического и конструкционного применения, что подчёркивает актуальность и практическую значимость проведённого исследования.

Таким образом, сравнительное рассмотрение методов модификации полипропилена открывает путь к созданию более надёжных и конкурентоспособных полимерных материалов, востребованных в различных отраслях.

Полученные с использованием радиационного и пероксидного подходов полимеры находят широкое применение в современных материалах и технологиях (Tanjung, F.A., 2022; Du, B., 2022; Wasti, S., 2022; Jamnongkan, T., 2022; Abdulkarimova, S.A., 2022).

Пространственно-связанная структура полипропилена способствует значительному росту его прочностных характеристик и устойчивости к деформациям, что делает его перспективным для эксплуатации в условиях высоких нагрузок (Das, O., et al., 2022).

Такая модификация расширяет температурный диапазон применения материала, включая сферы автомобилестроения и электротехники, где полимеры подвержены нагреву (Alshammari, B.A., 2021; Shirvanimoghaddam, K., 2021; Varga, L.J., 2021; Zhao, W., 2021; Ajourloo, M., 2021; Khan, T., 2021; Tsai, C.-Y., 2021).

Дополнительным преимуществом является повышение устойчивости к агрессивным химическим веществам, что важно для эксплуатации в промышленной среде (Bazunova, M.V., 2021).

Такие материалы демонстрируют улучшенную стойкость к УФ-излучению и окислению, что способствует продлению срока службы и повышению надёжности. Кроме того, они могут быть переработаны, что снижает объёмы отходов и открывает путь к более экологически чистым технологиям в строительстве и упаковочной индустрии (Zhang, Z., 2022; Liu, J., 2025; Mhaske, S.T., 2022).

Одним из рисков при использовании кабелей является их способность к воспламенению, что связано с горючестью оболочек и изоляционных материалов. Пиролиз этих компонентов - ключевая стадия развития возгорания. Исследование термического разложения таких полимеров играет важную роль в оценке пожарной опасности. Например, сшитый полиэтилен нашёл широкое применение в строительной электрике. (Skroznikov et al., 2011)

В работе (Mo S.J., et al. 2013) рассматриваются характеристики кабельного материала на его основе. Приведён анализ поведения при термическом разложении с использованием ТГА и ДСК. Это позволило изучить кинетику процессов пиролиза и механизмы термодеструкции.

Несмотря на высокое качество сшитого полиэтилена, его переработка затруднена из-за невозможности пластификации. Однако термохимические методы, включая сжижение и обработку сверхкритической водой, позволяют восстановить термопластичность. Технология, предложенная (Watanabe S., et al. 2003), позволяет рассекал сшитые фрагменты и получать перерабатываемый материал с характеристиками, сопоставимыми с исходными.

В настоящем исследовании было изучено термогравиметрическое поведение полиэтиленов с различной степенью сшивания как в присутствии катализатора, так и без него (Aguado et al., 2000). Установлено, что сам процесс сшивания незначительно ускоряет термическое разложение полиэтилена. Однако в условиях каталитического пиролиза наблюдается противоположный эффект: сшивание снижает активность катализатора, что выражается в повышении температуры начала крекинга. При этом чем выше степень сшивки, тем менее эффективно катализатор инициирует процесс разложения. Эти различия были проанализированы качественно, что позволило сделать вывод о возможности использования каталитического пиролиза для различения образцов по степени сшивания, в отличие от термического разложения, где такая чувствительность отсутствует (Marcilla A., 2006).

В отдельной работе рассматривалась термопластификация полиэтилена, модифицированного силаном, применяемого в качестве изоляционного материала для кабелей и проводов. Для переработки таких сшитых структур целесообразно восстановление термопластичности. С помощью химической реакции в сверхкритическом спирте был успешно получен термопластичный полиэтилен. Полученный материал продемонстрировал удовлетворительные механические и электрические характеристики, подходящие для применения в изоляции. Примечательно, что стандартные антиоксиданты, используемые для полиэтилена, оказались эффективны и в отношении переработанного продукта, что открывает перспективу для создания замкнутого цикла утилизации полиэтилена, модифицированного силаном (Goto T. et al., 2004).

Коммерческие образцы полиэтилена подвергались каталитическому разложению с использованием цеолитов H-ZSM-5 и Y-типа. Исследования проводились с применением термогравиметрического анализа (ТГА) и в реакторе с циклическими сферами (Marcilla et al., 2006).

Измерения позволили оценить каталитическую активность и устойчивость цеолитов к дезактивации (Aguado et al., 2000). Варьируя соотношение «пластик–катализатор», определяли оптимальные условия как для скрининга катализаторов, так и для эффективной работы реактора. Цеолиты Y-типа демонстрировали более низкую активность и более быструю дезактивацию по сравнению с H-ZSM-5. Увеличение модуля кремнезема в структуре катализатора снижало активность, но замедляло процесс дезактивации. При каталитическом пиролизе наблюдался высокий выход жидких углеводородов, в основном в диапазоне C₄–C₁₀, в отличие от термического разложения, где преимущественно образовывались воски (Schirmer J., 2001).

Сравнительный анализ (таблица 2) методов гравиметрического анализа (в частности, ТГА) в рамках каталитического разложения полиэтилена с цеолитами, где использовались те же или схожие катализаторы (цеолиты ZSM-5, Y и др.).

Таблица 2. Сравнительный анализ методов ТГА в исследованиях каталитического разложения полиэтилена

№ п/п	Катализаторы	Условия ТГА	Параметры оценки	Основные выводы
1	H-ZSM-5, Y-type	Темп. разлож. 400–500°C, воздух/инертная атмосфера, переменное соотношение PE: катализатор	Потеря массы, устойчивость катализатора, выходы фракций	H-ZSM-5 активнее Y-типа, при высоком Si/Al снижается активность, но растёт стабильность; пиролиз даёт C ₄ –C ₁₀ (Schirmer J., 2001)
2	HZSM-5, USY, MCM-41	ТГА: 10°C/мин до 600°C, атмосфера N ₂	Температуры начала/макс. разложения, остаточная масса, DTG-пики	ZSM-5 обеспечивает максимальное снижение температуры разложения PE; MCM-41 – низкая активность (Marcilla et al., 2007)
3	HZSM-5, HY, Ni-ZSM-5	ТГА при 20°C/мин, N ₂ , PE:катализатор = 10:1	Кинетика, остаточная масса, дезактивация катализатора	Ni-модифицированный ZSM-5 активнее и стабильнее; HY – быстрая дезактивация (Aguado et al., 2000)
4	HZSM-5 разных Si/Al	ТГА, DSC, TPR	Температуры и механизмы разложения	Повышение Si/Al повышает устойчивость, но снижает кислотность и активность (Serrano et al., 2003)
5	ZSM-5, Beta, Y	ТГА до 700°C, 5–20°C/мин, инертная атмосфера	Температуры разложения, кинетика, остаточная масса	Beta и ZSM-5 дают более высокую деградацию PE по сравнению с Y (López-Uriónabartenechea et al., 2011)

Параметры сравнения:

Температура начала и пика разложения: каталитическое разложение начинается при более низких температурах, чем термическое.

Остаточная масса: позволяет оценить полноту разложения и коксование. Скорость дезактивации: измеряется по смещению DTG-пиков и накоплению остаточной массы.

Выход фракций (непрямой метод в ТГА): подтверждается сопоставлением с пиролиз-газацией или GC-MS данных.

Влияние Si/Al: чем выше Si/Al, тем выше устойчивость, но ниже кислотность и, как следствие, активность (Serrano et al., 2003).

Выводы: (Skroznikov et al., 2011)

В работе (Aguado et al., 2000) методологически согласуется с более поздними исследованиями, включая применение ТГА для оценки активности и устойчивости катализаторов.

ZSM-5 остаётся наиболее активным цеолитом, обеспечивающим низкие температуры разложения и высокие выходы фракций топлива (Marcilla et al., 2006).

Учет Si/Al модуля – важнейший параметр для оценки как активности, так и устойчивости, что было подчеркнуто в работе (Serrano et al., 2003).

ТГА даёт качественное представление о начале разложения, максимуме деградации и остатках, что делает его универсальным методом в скрининге катализаторов (Aguado et al., 2000).

В другом исследовании полиэтилен низкой и высокой плотности, а также полипропилен подвергались деградации в реакторе с неподвижным слоем в интервале температур 375–550 °C как с катализатором (H-галлосиликат), так и без него (Aguado et al., 2000). Термическое разложение приводило к образованию воскообразных продуктов, причём выход сильно зависел от типа исходного полимера. В то же время каталитическая деградация над галлосиликатом обеспечивала получение преимущественно легких углеводородных фракций, обогащенных ароматическими соединениями - бензолом, толуолом и ксилолами. Распределение продуктов оказалось слабо зависящим от природы исходных полимеров, что объясняется механизмом, включающим скелетную изомеризацию и формирование термодинамически устойчивых изомеров. Катализатор продемонстрировал хорошую стабильность при многократном использовании за счёт низкого уровня коксообразования (Takuma K., 2001).

В работе (Hamidi N 2013) была разработана лабораторная установка для пиролиза пластиковых отходов, на основе данных термогравиметрического анализа (Aguado et al., 2000). В качестве образцов использовались пенополистирольные тарелки (SDP), упаковочный пенопласт (SPFB) и полиэтиленовые пакеты (CPB) (Lenfeld et al., 2020). Процесс пиролиза проводился при температурах до 650 °C без катализатора. Жидкие продукты анализировались методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Результаты показали, что температурные характеристики разложения зависят от химического состава полимера. Полистирольные отходы разлагались с максимальной скоростью при 418–440°C, производя стирол и его производные, тогда как CPB образовывал широкую углеводородную смесь (C₄–C₂₄), включающую алканы и алкены. Полученные фракции содержали реакционноспособные компоненты, требующие стабилизации для последующего использования в качестве топлива.

Методы пероксидной и радиационной сшивки успешно интегрируются в существующие производственные процессы, обеспечивая контроль над степенью сшивания и, как следствие, - над свойствами конечного продукта (Skroznikov et al., 2011). Это делает такие подходы экономически и технологически оправданными (Wakimoto, S., 1982; Alfred, M., 1992; Han et al., 2023).

Настоящая статья представляет обобщённый анализ современной научной литературы, посвящённой модификации полипропилена посредством радиационной и пероксидной сшивки.

Актуальность темы обусловлена широким применением сшитых полимеров, обладающих улучшенными физико-химическими свойствами, в различных отраслях промышленности (Han et al., 2023). В работе рассмотрены основные принципы указанных методов, проанализированы их преимущества, ограничения и влияние на ключевые эксплуатационные параметры материалов.

Проведённый сравнительный анализ позволил выявить наиболее перспективные направления использования этих технологий для создания полимерных систем с повышенной термической и химической стойкостью. Особое внимание уделено параметрам, влияющим на эффективность сшивания и стабильность полученных композитов. Это открывает новые возможности для разработки конструкционных и технических материалов, соответствующих современным требованиям к надёжности и долговечности (Korelin, A.A., 2019; Ren, Y., 2021; Han et al., 2023).

Применение пероксидной и радиационной сшивки обеспечивает возможность целенаправленного управления структурой и свойствами полипропилена, что особенно важно при производстве продукции для высокотехнологичных и экологически ориентированных отраслей. Сравнительный подход способствует более глубокому пониманию механизмов и выбора оптимального метода модификации в зависимости от конкретных условий эксплуатации и требований к конечному продукту (Wehtje, E.W., 1996; Kazalini, A., 2013; Korelin, A.A., 2019; Skroznikov, S.V., 2019; Ren, Y., 2021; Han et al., 2023).

Радиационная сшивка

В работе (Novikov, G.K 2017; Han et al., 2023) представлен обзор различных вулканизующих агентов, применяемых в процессах сшивки полимеров, осуществляемой в вулканизационных трубах при температурах свыше 250°C. Одним из направлений эффективной модификации является радиационная обработка.

Комбинированный подход, сочетающий радиационную сшивку и использование сверхкритического диоксида углерода ($scCO_2$), был применён для получения пеноматериалов на основе смеси низкоплотного полиэтилена (LDPE) и сополимера этилена с винилацетатом (EVA) (Han et al., 2023). В рамках исследования изучено влияние радиационной обработки на морфологию и свойства пен LDPE/EVA при различных соотношениях компонентов (Lenfeld et al., 2020). Оптимальным составом оказалась смесь LDPE/EVA в пропорции 70/30, при которой повышение дозы облучения способствовало снижению размера пор и увеличению плотности материала. Установлено, что доза 50 кГр обеспечивает наиболее равномерную структуру вспенивания. Радиационно модифицированные образцы также характеризуются более широким диапазоном температур пенообразования по сравнению с исходными.

Механизм сшивки объясняется ростом вязкости расплава, способствующим стабилизации пористой структуры. Однако при увеличении дозы до 100 кГр наблюдается ухудшение однородности из-за чрезмерной сшивки, особенно в аморфных областях. Добавление EVA в большей концентрации повышает степень сшивки, но снижает вязкость, что влияет на прочностные характеристики вспененного материала.

Актуальной задачей является разработка высокоэффективных технологий радиационной сшивки для полимерных изоляционных материалов, применяемых в электрических кабелях (Han et al., 2023). Особое внимание уделяется полиэтилену высокой (HDPE) и низкой плотности (LDPE) (Lenfeld et al., 2020). Степень сшивки оценивалась по гель-фракции, определённой после растворения в параксилоле, а доза облучения измерялась с помощью дозиметрии. Экспериментальные результаты показали, что проведение процесса при температуре 100°C и давлении 10 атм позволяет повысить эффективность сшивки на 40% по сравнению с традиционными методами. Существенное улучшение достигается при введении 0,1% диоксида свинца (PbO_2), что увеличивает поглощение рентгеновского излучения и ускоряет формирование сшитой структуры. При дозе 50 кГр гель-фракция составляет 40% для HDPE и 32% для LDPE в среде аргона с добавлением PbO_2 , тогда как в воздухе без добавок данный показатель не превышает 17–19%.

Предложенная методика способствует снижению радиационных рисков и энергозатрат, обеспечивая стабильное протекание процесса без ухудшения физико-механических свойств. Это делает её перспективной для промышленного применения в кабельной промышленности (Gunewardena, A. et al., 2008).

В другой работе приведены сравнительные исследования свойств изоляции на основе сшитого LDPE, полученной с применением рентгеновского излучения, генерируемого электрическим газовым разрядом (ЭГР) (Lenfeld et al., 2020). Эксперименты, проведённые на образцах согласно стандарту ГОСТ ИЕС 60811-2-1, а также на полномасштабных кабельных конструкциях, позволили оценить глубину проникновения излучения и влияние технологии на электрофизические и механические свойства материала. Было установлено, что рентгеновское облучение ЭГР способствует улучшению характеристик изоляции в сравнении с электронно-пучковым методом (Wu, J. et al., 2014).

Сшивка полиэтиленовой изоляции методом радиационного воздействия позволяет существенно повысить её надёжность и срок службы (Han et al., 2023). Однако оптимизация условий облучения имеет решающее значение, поскольку при неблагоприятных режимах возможно ухудшение структуры (Dadbin, S et al., 2002; Lenfeld et al., 2020). Систематические исследования подтвердили, что радиационная модификация с использованием ЭГР-излучения позволяет добиться улучшения механических и электрофизических характеристик.

Радиационно-индуцированное вспенивание полипропилена представляет собой эффективный метод модификации, обеспечивающий улучшение физических и механических характеристик (Lenfeld et al., 2020). В одной из работ рассмотрены ключевые стадии процесса: смешение компонентов, облучение и термообработка. В качестве вспенивающего агента применяли азобисформамид (10 мас. ч. на 100 мас. ч. полипропилена), а в качестве сшивающих агентов - дивинилбензол и другие многофункциональные соединения. Смесь подвергалась экструдированию при 463 К, затем облучалась дозой 8 Мрад, после чего прессовалась при 473 К с использованием водяного пара, что обеспечивало образование пены с равномерной структурой и плотностью около 50 кг/м³.

При уменьшении энергии облучения до 2 или 3 Мрад наблюдалось снижение качества структуры (Lenfeld et al., 2020). Также были исследованы альтернативные сшивающие агенты, такие, как диаллилфталат, этиленгликольдиакрилат и триаллилизотиоцианурат. Последний показал высокую эффективность при использовании совместно с азобисформамидом. Облучение электронным пучком (1 Мрад) и последующее нагревание до 473 К обеспечивали формирование пены с заданными свойствами. Таким образом, радиационно-индуцированная сшивка и вспенивание открывают широкие перспективы для создания новых функциональных материалов на основе полипропилена.

Наконец, активно исследуется радиационная сшивка суперабсорбирующих гидрогелей на основе полиакриламида (РААм) с добавлением природных полимеров — альгината натрия и хитозана (Han et al., 2023). Синтез таких материалов осуществляется с использованием γ -излучения, позволяющего формировать устойчивую трёхмерную сеть. Подобные гидрогели демонстрируют высокую водоудерживающую способность и перспективны для применения в сельском хозяйстве для улучшения водного режима почв.

Образцы предварительно обрабатывались раствором пероксида водорода (H₂O₂), затем смешивались и подвергались γ -облучению в диапазоне доз от 5 до 30 кГр (Schirmer, 2001). Для оценки характеристик полученных гидрогелей применялись различные аналитические методы, включая сканирующую электронную микроскопию, ИК-спектроскопию и термогравиметрический анализ (Lenfeld et al., 2020).

Среди изученных составов наибольшую водоудерживающую способность продемонстрировал гидрогель на основе полиакриламида (РААм) и альгината натрия (Alg), превосходя по этому показателю как РААм/CS, так и трехкомпонентный РААм/Alg/CS. Через 24 часа водопоглощение достигало 86%, тогда как чистый РААм удерживал лишь 38%

влаги. Полевые испытания на кукурузе показали, что применение гидрогеля PAAm/Alg при обработке почвы способствовало увеличению урожайности на 50%. Эти результаты подтверждают потенциал таких композиций в качестве эффективных почвенных кондиционеров.

Радиационно-сшитые гидрогели на основе полиакриламида и природных полимеров представляют собой перспективные материалы для аграрного сектора. Их способность сохранять влагу и создавать благоприятные условия для роста растений открывает новые возможности для использования в сельском хозяйстве. Дальнейшие исследования в данной области могут способствовать разработке более совершенных решений, направленных на повышение урожайности и устойчивости агросистем к климатическим стрессам (Zhang, C., et al., 2022).

Сшитый облучением полиэтилен (PEX) и его модифицированный аналог с наполнителем из технического углерода (CB-PEX) являются отходами производства кабельной продукции (Lenfeld et al., 2020). В данной работе изучается их пиролиз с применением ТГ/ДСК, ИК-Фурье-спектроскопии и кинетического анализа. Эксперименты проводились при температуре нагрева 10 °С/мин в атмосфере азота. Установлено, что основная стадия термического разложения происходит при 395–503 °С для PEX и при 408–515 °С для CB-PEX. Последний материал требует большего теплового ввода на данном этапе, демонстрируя более выраженное коксование и формируя остаток, богатый углеродом. В обоих случаях основными продуктами термического разложения являются олефины, однако их состав и распределение молекулярных масс существенно различаются. Практически весь PEX можно превратить в летучие компоненты, в то время как CB-PEX оставляет значительное количество остаточного углерода (Du Y., 2017).

Также изучалась возможность переработки полиэтилена, сшитого по силановому механизму (силан-XLPE), в термопластичный материал за счёт селективного разрушения силоксановых связей.

В исследовании использовались сверхкритические жидкости - спирт и вода - в автоклавных условиях. Полученные продукты анализировались методами ²⁹Si-ЯМР, ИК-Фурье-спектроскопии, гель-фракционирования и определения молекулярной массы. Показано, что при обработке сверхкритическим спиртом силоксановые мостики эффективно разрушались, в результате чего структура восстановленного полиэтилена приближалась к структуре полиэтилена, привитого силаном (Aguado et al., 2000).

Для проверки остатковой способности к сшиванию переработанный материал отверждали в насыщенном водяном паре и сравнивали с исходным силан-привитым ПЭ, а также его вариантом с добавлением катализатора. Расчёт кинетических параметров показал, что переработанный материал сохранял способность к последующей сшивке, а его энергия активации была близка к значениям для привитого ПЭ без катализатора. Это свидетельствует о потере активности катализатора под действием сверхкритического спирта (Goto T. et al., 2008; Hong S.M. et al., 2008).

Радиационные технологии находят всё более широкое применение в промышленности, обеспечивая возможность направленного изменения свойств материалов за счёт воздействия ионизирующего излучения (Han et al., 2023). Ключевыми физико-химическими процессами при этом являются возбуждение молекул, ионизация и образование свободных радикалов, которые инициируют реакции разрыва и образования химических связей. Это позволяет модифицировать структуру полимеров, проводить сшивку, улучшать механические и термические характеристики материалов.

Так, радиационная модификация полиэтилена с использованием электронного пучка способствует формированию пространственной сетки за счёт поперечного сшивания, что значительно повышает прочностные свойства и термостойкость изделий (Han et al., 2023).

Кабельные изоляции, обработанные данным методом, способны выдерживать более высокие температурные и электрические нагрузки, позволяя заменить более дорогие фторполимерные покрытия.

Интерес к термопластичным полимерам, таким, как полиолефины, включая полиэтилен и полипропилен, постоянно возрастает. Эти материалы отличаются низкой плотностью, высокой химической инертностью и хорошими эксплуатационными характеристиками, что делает их востребованными в строительстве, энергетике и коммунальном хозяйстве, особенно в системах трубопроводов и водоснабжения. (Skroznikov et al., 2011)

Свободнорадикальная прививка малеинового ангидрида (МА) на полилактид (ПЛА) была осуществлена методом реактивной экструзии. Все эксперименты проводились с добавлением 2 мас. % МА в присутствии инициатора - 2,5-диметил-2,5-ди(трет-бутилперокси)гексана (Lupersol 101).

Исследовали влияние температуры (180 и 200°C) и концентрации инициатора (0,0–0,5 мас. %) на степень прививки. Полученные значения содержания привитого МА варьировались от 0,066 до 0,672 мас. %. Для характеристики модифицированного ПЛА применялись методы эксклюзионной хроматографии (TriSEC), измерения индекса текучести расплава и термогравиметрии.

Результаты показали, что увеличение содержания инициатора повышает степень прививки, но приводит к снижению молекулярной массы. Модификация ПЛА малеиновым ангидридом существенно улучшила межфазное взаимодействие с нативным кукурузным крахмалом в композитах, полученных методом расплавного смешивания (Carlson D. et al., 1999).

Пероксидная сшивка

Сшитый полиэтилен (СПЭ) широко применяется в качестве изоляционного материала в кабелях среднего и высокого напряжения благодаря превосходным механическим, термическим и электрическим свойствам, существенно превосходящим характеристики линейного полиэтилена (Carlson, D., 1999).

Один из наиболее распространённых методов его получения - пероксидная сшивка, осуществляемая в вулканизационной трубе при температуре свыше 400 °C в инертной атмосфере, чаще всего в среде азота. Эффективность данного процесса во многом определяется рациональностью выбора технологических параметров, обеспечивающих высокую степень сшивки.

В рамках исследования были экспериментально зафиксированы температурные и скоростные поля по всему объему расчетной области. Построены температурные профили на поверхности изоляции и токопроводящей жилы, определены кинетические параметры процесса сшивки, а также проанализировано влияние теплофизических и кинетических характеристик изоляционного материала на распределение температуры и степень сшивки. На основании полученных данных выделены ключевые и второстепенные факторы, влияющие на эффективность вулканизации.

Разработанная математическая модель описывает тепломассоперенос и химические преобразования, происходящие в процессе сшивки, с учетом геометрических и теплофизических характеристик кабелей различных типоразмеров. Модель позволяет как количественно, так и качественно предсказывать распределения температур и степень сшивки по длине и сечению изделия, тем самым обеспечивая возможность оптимизации технологических режимов линии вулканизации для повышения качества продукции и снижения энергетических затрат (Park, H., et al., 2019).

Сшивка полиэтилена может осуществляться как радиационными, так и химическими методами. Наиболее технологически доступным является пероксидный способ, в котором в качестве сшивающего агента применяются органические пероксиды, разлагающиеся с образованием свободных радикалов в процессе переработки. Регулируя концентрацию инициатора, можно контролировать структуру полимера, переходя от линейной к

пространственно-сетчатой. Например, сшитый полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) с содержанием нерастворимой фазы свыше 70 % теряет способность к термоплавлению и сварке, при этом повышаются жесткость, модуль упругости и термостойкость материала.

В исследовании (Gu, J., 2020) методом реактивной экструзии были получены образцы ПЭВП и смесей ПЭВП/ПП, сшитые с использованием дикумила пероксида (ДКП). Изучено влияние концентрации ДКП на реологические и механические характеристики. Установлено, что с увеличением содержания ДКП повышается молекулярная масса и расширяется ее распределение. При низких концентрациях (до 0,1 мас. %) наблюдается рост удлинения при разрыве, в то время как при более высоких данный показатель снижается. Введение ПП в систему приводит к некоторому снижению прочностных характеристик, однако добавление ДКП улучшает совместимость фаз, что подтверждается морфологическим анализом поверхностей излома и приводит к увеличению ударной вязкости.

Модификация полиэтилена с помощью пероксидов также позволяет существенно повысить его эксплуатационные характеристики. Сшивка повышает стойкость к химической коррозии, растрескиванию под воздействием окружающей среды, ползучести, а также электрическую прочность. Температура длительной эксплуатации кабеля на основе СПЭ может достигать 90°C, а при кратковременном токе короткого замыкания - до 170–250°C (Mamedli, U.M., 2018).

Особый интерес представляют органические пероксиды циклических кетонов, обладающие высокой эффективностью при модификации (со)полимеров. Как показано в работе (Skroznikov, S.V., et al., 2011), использование композиций, содержащих не менее 20 % активного кислорода, связанного с циклическими кетонами, способствует эффективной сшивке и улучшению эксплуатационных характеристик полученного материала.

Математические модели, представленные в работах (Likozar, B. & Krajnc, M., 2011; Akbarian, D., 2019; Chaudhary, B.I., 2010; Kruzalak, J., 2020; Liu, S.-Q., 2014; Yeoh, O.H., 2012; Kryzhanovskij, V.K., 2016; Kovalenko, D.V., 2025; Korelin, A.A., 2024), позволяют количественно описывать процессы теплопереноса, кинетику сшивки, а также рассчитывать оптимальные технологические режимы для конкретных условий производства. Проверка модели на практике подтвердила её высокую точность и применимость для оптимизации процессов в существующих и проектируемых производственных линиях.

Таким образом, пероксидная сшивка представляет собой универсальный и высокоэффективный метод модификации полиэтилена, позволяющий получить материал с улучшенными характеристиками, востребованный в широком спектре промышленных применений, в первую очередь, в кабельной промышленности (Chaudhary, B.I., Peterson, T.H. 2010).

Результаты верификации разработанной математической модели свидетельствуют о её высокой точности, что делает возможным её применение для совершенствования как вновь создаваемых, так и действующих технологических линий. Это, в свою очередь, позволяет определять оптимальные параметры вулканизации, обеспечивающие получение качественного продукта при минимальных энергозатратах (Cui, S., 2017).

В одном из исследований была проведена оценка влияния модификации с применением органического пероксида и системы пероксид/ТМПТА на реологические и физико-механические характеристики смесей полипропилена и этиленпропиленового каучука (ПП/СКЭПТ) в соотношении 80/20 мас. %. В качестве полипропилена использовалась марка ПП 21030 с показателем текучести расплава 3 г/10 мин, а в качестве эластомера - две разновидности СКЭПТ, отличающиеся молекулярной массой и вязкостью. В качестве инициатора применяли 1,4-бис(2-трет-бутилпероксиизопропил) бензол, а соагентом служил триметилпропантриакрилат (Ryzhikova, I.G., et al., 2013).

Эксперименты показали, что максимальная ударная вязкость достигается при использовании только пероксидного инициатора. Высокомолекулярные марки каучука обеспечивают формирование ударопрочных композиций преимущественно при пероксидной

модификации. При этом система на основе пероксида и ТМПТА способствует улучшению комплекса физико-механических свойств смесей с низкомолекулярным СКЭПТ-2 и позволяет сохранить модуль упругости в системах с СКЭПТ-1. Проведённый анализ морфологии смесей ПП/СКЭПТ, модифицированных системой органический пероксид - полифункциональный винилмономер, показал зависимость получаемых характеристик от молекулярной массы эластомерного компонента (Djatlov, I. Ja., 2023).

В другом исследовании оценивалось влияние концентрации дикумилпероксида (ДКП), сенсibilизатора - олигоэфиракрилата и молекулярной массы полиэтилена на кинетику отверждения, плотность поперечных сшивок и прочностные характеристики полученного сшитого полиэтилена (СПЭ) при повышенных температурах. Добавление сенсibilизатора позволило существенно сократить необходимое количество ДКП (до 1–1,5 мас. %) и ускорить процесс сшивания в 2–3 раза. При этом наблюдалось увеличение плотности сетки и прочности материала до уровня, соответствующего стандартам МЭК. Время полного отверждения при температуре 260–280°C составило 10–20 секунд, а энергия активации снизилась до 40 кДж/моль (Sadirova, S.N., 2022).

В области инженерных коммуникаций наблюдается тенденция к замещению полипропиленовых трубопроводных материалов на изделия из сшитого полиэтилена, обладающего улучшенными эксплуатационными характеристиками. Современные методы анализа, основанные на обработке научных данных и интеллектуальных алгоритмах, подтверждают целесообразность такого выбора. Сравнительный анализ различных типов изоляционных материалов для кабелей демонстрирует, что каждый из них имеет как достоинства, так и ограничения, обусловленные их структурой и способом модификации (Abdukarimova, S.A; Das, O., et al., 2022).

В то же время растущее количество полимерных отходов требует эффективных решений в области их утилизации и повторного использования. Одним из перспективных направлений является включение вторичных полимеров в состав строительных композиций, в частности, - для модификации асфальтобетонных смесей. Согласно приведённым данным, использование рециклированных пластиков не только способствует снижению экологической нагрузки, но и улучшает свойства дорожных покрытий.

Актуальной задачей остаётся разработка новых вяжущих систем, обеспечивающих высокую прочность, термостабильность, устойчивость к динамическим и температурным воздействиям. В работах (Dadbin, S., 2002) подчёркивается значимость применения макромолекулярных отходов - полиэтилена, полипропилена и резиновых компонентов - в качестве функциональных добавок к битуму. Такие полимеры демонстрируют высокий потенциал в упрочнении асфальтобетонных композиций за счёт повышения сцепления между органическими и минеральными фазами, улучшения гибкости и устойчивости к деформациям.

Особое внимание уделяется использованию адгезионных компатибилизаторов - специализированных добавок, способствующих повышению термодинамической совместимости между полимерными и битумными фазами. Применение таких веществ обеспечивает улучшенную дисперсию полимерных частиц в битумной матрице, способствует формированию более однородной микроструктуры и снижает риск расслоения или деформации покрытия в процессе эксплуатации. Как показано в исследовании, внедрение модифицированных полимерных компонентов позволяет повысить прочность дорожного покрытия на 27% по сравнению с образцами на основе традиционного битума. Кроме того, срок службы таких покрытий увеличивается в среднем в 1,5 раза, что делает данную технологию не только технически эффективной, но и экономически оправданной.

В рамках эксперимента были изучены битумные композиции с добавлением различных ингредиентов: измельчённых утилизированных резиновых изделий (в частности, автомобильных шин), техногенных золошлаковых отходов, а также разнообразных типов полимерных компатибилизаторов и модификаторов. Проведённые испытания подтвердили

повышение устойчивости составов к усталостным нагрузкам, термическому старению и водонасыщению, что особенно важно для регионов с экстремальными климатическими условиями и высокой интенсивностью транспортного потока.

Таким образом, представленное исследование демонстрирует значительный потенциал применения переработанных полимерных отходов в дорожной сфере. Интеграция таких материалов в асфальтобетонные смеси позволяет не только решать актуальные экологические задачи, связанные с утилизацией полимеров, но и получать материалы с улучшенными физико-механическими характеристиками. Комплексный подход к переработке и внедрению макромолекулярных отходов открывает новые перспективы для устойчивого развития инфраструктурных проектов и оптимизации технологий дорожного строительства (Wakimoto, S., et al. 1982).

В современных силовых кабелях среднего и высокого напряжения применяется сшитый полиэтилен, обладающий значительно улучшенными механическими свойствами по сравнению с линейным полиэтиленом. Процесс сшивки реализуется пероксидным методом в вулканизационной трубе при температуре свыше 400°C в азотной атмосфере. Для обеспечения качественной изоляции необходимо определить оптимальные параметры технологического процесса, гарантирующие высокую степень сшивки полимера. Цель работы - разработка математической модели тепломассопереноса в вулканизационной трубе и выявление ключевых факторов для выбора рационального режима обработки.

Проведена оценка сходимости вычислительной модели, получены распределения температуры и скорости в исследуемом объёме. Экспериментально определены кинетические параметры вулканизации. Проанализировано влияние теплофизических и кинетических характеристик на температурное поле и степень сшивки изоляционного материала (Korelin, A.A., 2020).

Разработанная модель описывает процессы тепломассопереноса и вулканизации для различных типоразмеров кабелей, что способствует эффективному использованию линии вулканизации с учётом свойств изоляционных материалов. Модель демонстрирует распределение температур и скоростей в расчетной области, а также позволяет оценить влияние кинетических и теплофизических параметров на уровень сшивки. Полученные результаты дают возможность визуализировать процесс тепломассопереноса и определить оптимальные технологические условия для кабелей различных марок.

В статье (Buev, S.A., 2021) рассматриваются основные методы сшивания полиэтилена, степень сшивки и её влияние на свойства сшитого материала, а также преимущества и недостатки каждого способа и сферы их применения.

Сшивка не влияет на кристалличность полимера, поскольку она задаётся при введении силана. В пероксидной и радиационной технологиях образование поперечных связей происходит случайным образом, что делает силановую методику более подходящей для сохранения кристаллической структуры (Han et al., 2023). Механические свойства указывают на более однородное сшивание при пероксидном способе, хотя различия минимальны. Все методы обеспечивают схожие показатели, при условии соблюдения технологических регламентов.

Пероксидная сшивка требует специализированного оборудования из-за высокого противодавления и требует осторожного обращения с пероксидными соединениями. Степень сшивки зависит от дозировки пероксида, содержания антиоксидантов и температуры процесса. Сшитый полиэтилен характеризуется универсальными показателями прочности и термостойкости, что делает его оптимальным для применения в напорных трубах, системах отопления, изоляции высоковольтных кабелей и строительных конструкциях.

Положительные свойства сшитого полиэтилена (Haque, S.M., et al., 2021; Ryzhikova et al., 2013) обусловлены процессом образования поперечных связей между макромолекулами, формирующих трёхмерную сетчатую структуру, которая и определяет высокие электрические и механические параметры материала. При производстве кабелей с изоляцией

из СПЭ напряжением 10 кВ применяются две технологии сшивки: пероксидная - на линиях газовой вулканизации для кабелей среднего (10–35 кВ) и высокого напряжения (110 кВ и выше), а также силановая для кабелей низкого и среднего напряжения (0,66–20 кВ).

Наиболее распространённой технологией является пероксидная сшивка, при которой полиэтилен модифицируется с применением органических пероксидов в инертной газовой среде при строго контролируемых температурных и давленческих условиях. Этот подход обеспечивает высокую степень поперечной сшивки, исключает формирование воздушных включений и придаёт материалу превосходные электрические и механические характеристики, что делает его оптимальным выбором для изоляции кабелей среднего и высокого напряжения (Sadirova, S.N. 2022).

Одним из преимуществ данного метода является использование перекиси дикумила в качестве инициатора реакции. В процессе механического воздействия на изоляционный слой наблюдается характерный запах, отпугивающий грызунов и насекомых, что повышает эксплуатационную надёжность продукции в подземных или технических помещениях. Несмотря на более высокую себестоимость, изделия на основе сшитого полиэтилена (СПЭ) демонстрируют улучшенные эксплуатационные характеристики по сравнению с кабелями на базе обычного полиэтилена (БПИ), что делает их применение экономически обоснованным.

В работе исследованы реологические параметры переработанного полипропилена, модифицированного минеральными наполнителями (мелом и алюмосиликатными микросферами), при термопластичной переработке методами экструзии и литья под давлением. Композиционные материалы были получены прессованием и инъекционным формованием. Вязкость расплава измерялась с использованием реометра Haake Mars III.

Все образцы продемонстрировали неньютоновское поведение с выраженными вязкоупругими и псевдопластичными свойствами, а также снижением вязкости при увеличении частоты деформации. На основе экспериментальных данных были построены модели, позволяющие прогнозировать поведение системы в условиях реального производства. Установлена взаимосвязь между расчетными значениями вязкости и измеренным модулем упругости, что расширяет возможности математического описания процесса переработки.

Улучшенные свойства сшитого полиэтилена обусловлены трансформацией его молекулярной архитектуры в процессе образования пространственной решётки. Формирование поперечных связей между макромолекулами приводит к появлению трёхмерной сетчатой структуры, которая обеспечивает высокий уровень термостойкости и механической прочности. В кабельной промышленности применяются два основных способа модификации изоляции для напряжения до 10 кВ: пероксидный для изделий среднего и высокого напряжения, а также силановый - для низковольтных и промежуточных линий (Zjuzin, A.M., et al., 2022).

Кабели, основанные на СПЭ, становятся ключевым элементом энергетической инфраструктуры стран СНГ. Расширение применения силановой технологии позволит увеличить срок службы продукции, повысить стабильность работы энергосистем и улучшить экономические показатели (Zhigalov, D.V., 2010).

Согласно данным (Timakov, E.A., et al., 2020), в области пороговой концентрации проводящего наполнителя структура полимерных композитов на основе этиленвинилацетата радикально изменяет характер температурной зависимости удельного объёмного сопротивления $\rho(T)$. При повышении содержания технического углерода наблюдается резкое снижение максимального значения относительного сопротивления $\rho(T)_{\max}/\rho_{20}$, что связано с переходом механизма проводимости.

Существует несколько промышленных технологий поперечной модификации полиэтилена. Основные из них:

-РЕХ-а - термическое сшивание с использованием органических пероксидов; (Skroznikov et al., 2011)

- РЕХ-Ь - химическая модификация с применением силанов;
- РЕХ-с - радиационная активация;
- РЕХ-d - азотирование полимерной матрицы.

Продукция из сшитого полиэтилена, включая трубопроводы, способствует снижению затрат на установку, упрощает монтаж и повышает эксплуатационную безопасность, что оказывает положительное влияние на общее качество инженерных систем. В то же время маркетинговая конкуренция между производителями может дезориентировать потребителей, что подчёркивает значимость достоверной технической документации и прозрачных характеристик продукции.

Примером применения качественной технологии может служить продукция компании VALTEC, выпускающая трубы VALTEC PEX-EVON, изготовленные по технологии "РЕХ-Ь". Они предназначены для использования в низкотемпературных системах отопления, не содержат противоречивых утверждений о применимости и совместимы с наиболее распространёнными фитингами. При равном уровне качества они остаются экономически доступными альтернативами продукции конкурентов (Tzelepis, D.A., et al., 2023).

Проблема совершенствования процессов переработки полиолефинов, в частности, при вспенивании с использованием пероксидных инициаторов, остаётся актуальной ввиду токсичности побочных продуктов (Gunewardena et al., 2008).

Согласно результатам (Timakov, E.A., et al., 2020), предлагается замена высокоопасных пероксидов менее токсичными агентами, например, триаллилциануратом. Поскольку степень образования поперечных связей коррелирует с вязкостью системы, для оценки последней использовался пластометр Брабендера. Установлено, что оптимальная степень сшивки достигается при крутящем моменте в диапазоне 1700–1900 г·м.

Установлено, что введение 2 мас. ч. триаллилцианурата позволяет снизить содержание перекиси дикумила на 50% без потери необходимой степени сшивки. Такое уменьшение количества инициатора также способствует снижению уровня летучего ацетофенона - токсичного побочного продукта термического разложения перекиси, который может накапливаться в воздухе рабочей зоны (Du, B., et al., 2022). Изучена зависимость показателя крутящего момента от концентрации триаллилцианурата и пероксидного инициатора, что позволило определить минимальное количество последнего (0,2 мас. ч.), обеспечивающее требуемую степень поперечной сшивки. Применение триаллилцианурата в качестве соинициатора дает возможность получать пеноматериалы, не уступающие по эксплуатационным характеристикам традиционным составам. Данный подход улучшает условия труда и снижает токсическую нагрузку производственного процесса, способствуя повышению его экологической безопасности (Du, Y., et al., 2017).

В представленной работе (Gunewardena et al., 2008) рассматривается проблема переработки полиолефиновых материалов, при изготовлении которых применяются сшивающие агенты на основе органических пероксидов. Пероксидная технология получения вспененных полимеров является одной из наиболее распространённых во всем мире, что подчеркивает актуальность её совершенствования.

Основная трудность при работе с такими инициаторами заключается в образовании значительного количества побочных соединений, обладающих токсичными свойствами и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду и здоровье персонала. В исследовании (Siraut, C.S., 2008) предложено уменьшить содержание вредной перекиси посредством добавления в состав менее опасного соинициатора сшивания - триаллилцианурата. Поскольку степень сшивки полиэтилена прямо коррелирует с вязкостью системы, для оценки этого параметра использовался пластометр Брабендера. В результате было определено, что оптимальной степенью сшивки обладают образцы с показателем крутящего момента в диапазоне 1700–1900 г·м. Подтверждено, что введение 2 мас. ч. триаллилцианурата позволяет сохранить требуемую степень поперечной сшивки при одновременном снижении концентрации перекиси дикумила вдвое. Соответственно,

снижается и количество ацетофенона, образующегося при разложении инициатора. Показана зависимость крутящего момента от содержания триаллилцианурата и перекиси, а также выявлена минимальная доза инициатора (0,2 мас. ч.), обеспечивающая необходимую степень сшивки. Установлено, что замена части перекиси на триаллилцианурат позволяет получать пеноматериалы, по своим свойствам не уступающие традиционным аналогам.

Клеевые композиции на основе полиуретанов и полимочевины находят широкое применение в таких наукоемких отраслях, как автомобилестроение, электроника, медицинская техника и строительные технологии (Cui, S., et al., 2017). Их популярность обусловлена высокой адгезионной способностью, устойчивостью к химическим воздействиям и широким диапазоном механических характеристик. Основопологающим фактором, определяющим эксплуатационные качества данных материалов, является их рецептурный состав. Оптимизация состава, направленная на установление связи между компонентами, морфологическими особенностями и физико-механическими свойствами (концепция «состав–структура–свойства»), является ключевым направлением в разработке новых клеевых систем.

В работе (Du Y., et al., 2017) исследовано влияние массовой доли жёсткого сегмента (HSWF) и количества отшелушивающихся графеновых нанопластинок (xGnP) на линейно-вязкоупругие свойства нанокомпозитов с матрицей на основе полимочевины (PUa), синтезированной с использованием изофторондифенилдиизоцианата (IPDI). Для структурно-механического анализа применялись методы сканирующей электронной микроскопии (SEM) и динамического механического анализа (DMA).

Экспериментальные данные показали, что увеличение HSWF способствует значительному повышению жесткости материала: модуль хранения при растяжении возрастает от ~10 МПа при 20% HSWF до ~100 МПа при 30%, достигая ~250 МПа при 40%. Это свидетельствует о существенном влиянии степени сшивки жестких сегментов на прочностные характеристики системы. Эффект от добавления xGnP оказался менее выраженным; только при 20% HSWF добавление графеновых нанопластинок вызвало прирост модуля хранения примерно на 80%, что указывает на синергетическое взаимодействие при определенном соотношении компонентов.

Для корректного описания полученных реологических характеристик разработана новая модель, основанная на принципах дробного исчисления. Предложенная математическая схема позволяет точно описывать поведение модулей хранения и потерь в широком интервале температур (от -70°C до $+70^{\circ}\text{C}$) и частот (от 0,1 до 100 c^{-1}), используя всего шесть параметров, обладающих физическим смыслом. Такая параметризация обеспечивает высокую точность аппроксимации и облегчает анализ влияния морфологических факторов на вязкоупругие характеристики клеевых нанокомпозитов.

Полученные результаты открывают возможности для целенаправленного создания клеевых систем на основе полимочевины с заданными эксплуатационными характеристиками. Контролируя соотношение жестких сегментов и наполнителя, можно регулировать модуль упругости и адаптировать материал к условиям конкретного применения.

Сшивка полипропилена (ПП) является эффективным средством повышения термической устойчивости, прочностных характеристик и химической инертности материала. Среди различных подходов к структурной модификации полимеров наибольший интерес представляют радиационная и пероксидная сшивка, особенно в контексте создания композиционных материалов с целевыми свойствами (Han et al., 2023).

Пероксидная технология основана на применении органических перекисей, которые инициируют образование свободных радикалов, способствующих формированию поперечных связей между макромолекулами. Этот метод характеризуется высокой реакционной активностью и относительно простым технологическим оснащением. К числу его преимуществ можно отнести легкость интеграции в существующие производственные

линии, возможность управления степенью сшивки путем изменения концентрации иницирующего агента, а также доступность исходных реагентов. Основными ограничениями являются риск термической деструкции полимера при избытке перекиси и необходимость удаления остаточных продуктов разложения инициаторов.

Радиационная сшивка реализуется под воздействием ионизирующего излучения (γ -лучей, ускоренного электронного пучка и др.), что обеспечивает более равномерное распределение поперечно сшитых участков в объеме материала (Han et al., 2023).

Отсутствие химических инициаторов способствует получению более чистой структуры с минимальным уровнем побочных продуктов (Lenfeld et al., 2020).

Кроме того, степень сшивки может точно регулироваться посредством изменения дозы облучения и условий обработки. Однако высокая стоимость оборудования, необходимость соблюдения строгих норм радиационной безопасности и требований к экранированию рабочих зон сдерживают широкое применение данного метода, особенно в условиях мелкосерийного или мобильного производства.

Сравнительный анализ показывает, что выбор метода модификации должен основываться на характеристиках композиционного материала, требуемых конечных свойствах изделия и экономических параметрах производства.

Пероксидная сшивка наиболее целесообразна при изготовлении труб, пленочных и листовых материалов, где требуются умеренные характеристики при минимальных затратах. Радиационный подход оправдан при производстве изделий, к которым предъявляются повышенные требования по тепловой стабильности, устойчивости к растрескиванию и стерильности (например, в медицинской или пищевой упаковке).

Перспективным направлением является комбинированный метод, при котором полимер сначала подвергается пероксидной активации, а затем - радиационной обработке. Такой гибридный подход может обеспечить синергетический эффект, позволяя получить материалы с уникальным балансом свойств (Han et al., 2023).

Таким образом, оба метода обладают определёнными преимуществами и ограничениями, а их эффективность определяется конкретными технологическими задачами. Будущие исследования должны быть направлены на оптимизацию параметров сшивки, разработку новых иницирующих агентов, совместимых с полипропиленовой матрицей, а также на всестороннее изучение эксплуатационного поведения полученных композиционных материалов.

5. Заключение

Проведённый обзор методов пероксидной и радиационной сшивки полиэтилена продемонстрировал, что оба подхода способны эффективно повышать физико-механические и термостойкие характеристики материала, расширяя области его промышленного использования. Тем не менее выбор конкретной технологии должен основываться на комплексной оценке производственных, эксплуатационных и экономических факторов (Han et al., 2023).

Пероксидная сшивка отличается технологической простотой, широкодоступным оборудованием и высокой эффективностью при серийном производстве, особенно в таких областях, как изготовление трубной продукции. Однако данный способ сопровождается образованием побочных соединений, что может снижать экологическую чистоту конечного продукта.

Радиационная сшивка, напротив, обеспечивает более однородную и контролируемую структуру материала, исключает необходимость применения химических инициаторов и наилучшим образом подходит для изделий с повышенными требованиями к санитарно-гигиеническим и функциональным характеристикам (Han et al., 2023). Вместе с тем, реализация данного метода требует сложной, дорогостоящей аппаратуры и соблюдения норм радиационной безопасности.

Следовательно, выбор наилучшего метода модификации полиэтилена определяется спецификой конечного применения (Nayva, V.B., et al. 2024). В современных производственных условиях представляется целесообразным рассматривать оба способа как взаимодополняющие - это позволяет создавать материалы с заданными свойствами для решения широкого спектра технологических задач.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация - А.Т. и Л.Т.; методология - Л.Т.; программное обеспечение - А.К., Л.Т. и З.Е.; валидация - Г.С., Г.Т. и Л.Т.; формальный анализ - Г.С. и Г.Т.; исследование - А.К., Л.Т.; ресурсы - Л.Т.; курирование данных - Г.С.; написание - подготовка оригинального черновика - А.К.; написание - рецензирование и редактирование - А.К., Г.С. и Л.Т.; визуализация - Г.С. и Г.Т.; руководство - Г.С.; администрирование проекта - Г.С.; получение финансирования - Г.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторах:

Турсынова Арайлым Кабиденевна – кандидат химических наук, и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: tursynova_ak@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8957-039X>

Толымбекова Лязат Байгабыловна – кандидат технических наук, старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: tolymbekova_lb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3785-7943>

Сейтенова Гайни Жумагалиевна – кандидат химических наук, доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: seitenova_gzh@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Тажкенова Гаухар Каргабаевна – кандидат химических наук, доцент, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: gaukhar-1970@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0491-593X>

Елемесова Зарина Сериковна – докторант, обучающий по образовательной программе: «D089-Химия», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, Казахстан, 010000; email: yelemessova_zs@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3020-9492>.

9. Финансирование: BR24992883 «Создание научно-технологического парка нефтехимии и полимерных материалов для предоставления услуг и внедрения прикладных результатов НИР в приоритетные сектора экономики страны».

10. Благодарность: Выражаем благодарность АО «Парк ядерных технологий». г. Курчатов.

11. Конфликты интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Спонсоры не принимали участия в разработке исследования, сборе, анализе или интерпретации данных, написании рукописи или принятии решения о публикации результатов.

12. Список литературы

1. Abdukarimova, S.A., Bozorova, N.H., Turaev, J.R. (2022). Osobennosti modifikacii polipropilena. [Features of polypropylene modification]. *Universum: Tekhnicheskie Nauki:*

- Elektronnyi Nauchnyi Zhurnal [Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal]* 1(94), 80–84. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.94.1.12949>
2. Aguado, J., Serrano, D.P., Escola, J.M., Garagorri, E. (2002). Catalytic conversion of low-density polyethylene using a continuous screw kiln reactor. *Catalysis Today* 75, 257-275. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00077-9)
 3. Ajourloo, M., Ghodrati, M., Kang, W.H. (2021). Incorporation of recycled polypropylene and fly ash in polypropylene-based composites for automotive applications. *Journal of Polymers and the Environment* 29, 1298–1309. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01961-y>
 4. Akbarian, D., Hamed, H., Damirchi, B., Yilmaz, D.E., Penrod, K., Woodward, W.H., Moore, J., Lanagan, M.T. (2019). Atomistic-scale insights into the crosslinking of polyethylene induced by peroxides. *Polymer* 183, 121089. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121089>
 5. Alfred, M.L., Lawrence, H.E., Wilfred, F.B. (1965). Improvements in and relating to the manufacture of particulate expandable polymers and to the manufacture of expanded polymers therefrom (GB Patent No. 1062307). United Kingdom).
 6. Alsabri, A., Tahir, F., Al-Ghamdi, S.G. (2023). Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. *Materials Today: Proceedings* 56, 2245–2251. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574>
 7. Alshammari, B.A., Alsuhybani, M.S., Almushaikeh, A.M., Alotaibi, B.M., Alenad, A.M., Alqahtani, N.B., Alharbi, A.G. (2021). Comprehensive review of the properties and modifications of carbon fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymers* 13(15), 2474. <https://doi.org/10.3390/polym13152474>
 8. Avaev, A.A., Osipov, J.R. (2018). Matematicheskaja model' teploperenosa v processe termicheskoj vulkanizacii pokrytija iz jelastomera na metallicheskoj plastine. [Mathematical model of heat transfer during thermal vulcanization of an elastomer coating on a metal plate]. *Vestnik Cherepoveckogo Gosudarstvennogo Universiteta [Bulletin of Cherepovets State University]* 1(82), 14–19. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-1-82-1>
 9. Banu, R.D., Balaji, R., Arunachalam, R., Elumalai, P. (2024). Synthesis, characterization, thermal and mechanical behavior of polypropylene hybrid composites embedded with CaCO₃ and graphene nanoplatelets (GNPs) for structural applications. *AIMS Materials Science* 11(3), 463–494. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2024024>
 10. Bazunova, M.V., Smirnov, A.V., Sadritdinov, A.R. (2021). Poluchenie i svojstva polimernyh kompozitov na osnove polipropilena i oksida aljuminija. [Preparation and properties of polymer composites based on polypropylene and aluminum oxide]. *Vestnik Bashkirskogo Universiteta [Bulletin of Bashkir University]* 26(1), 79–83. <https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2021.1.13>
 11. Buev, S.A. (2021). Analiz parametrov kabelja s izoljaciej iz sshitogo polijetilena, podverzhennogo teplovomu stareniju. [Analysis of cable parameters with cross-linked polyethylene insulation subjected to thermal aging]. *Vestnik MGTU [Bulletin of the Moscow State Technical University]* 24(4), 341–349. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-341-349>
 12. Carlson, D., Nie, L., Narayan, R., Dubois, P. (1999). Maleation of polylactide by reactive extrusion. *Journal of Applied Polymer Science* 72(4), 477–485. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990425\)72:4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990425)72:4)
 13. Chaudhary, B.I., Peterson, T.H. (2010). Thermoreversible crosslinking of polyethylene enabled by free radical initiated functionalization with urethane nitroxyls. *Polymer* 51(1), 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.11.039>
 14. Cui, S., Luo, X., Li, Y. (2017). Synthesis and properties of polyurethane wood adhesives derived from crude glycerol-based polyols. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 79, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.04.008>

15. Czakaj, J., Majewski, Ł., Żenkiewicz, M., Puszka, A. (2024). Mechanical and thermal properties of polypropylene, polyoxymethylene, and poly(methylmethacrylate) modified with adhesive resins. *Journal of Composites Science* 8(10), 384. <https://doi.org/10.3390/jcs8100384>
16. Dadbin, S., Frounchi, M., Haji-Saeid, M., Gangi, F. (2002). Molecular structure and physical properties of E-beam crosslinked low-density polyethylene for wire and cable insulation applications. *Journal of Applied Polymer Science* 86(8), 1959–1969. <https://doi.org/10.1002/app.11111>
17. Das, O., Babu, K., Shanmugam, V., Sykam, K., Tebyetekerwa, M., Esmaeely Neisiany, R., Forsth, M., Sas, G., Gonzalez-Libreros, J., Capezza, A.J., Hedenqvist, M.S., Berto, F., Ramakrishna, S. (2022). Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, 112054. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.11254>
18. Dyatlov, I.Ia. (2023). Matematicheskoe i algoritmicheskoe obespechenie sistemy podderzhki prinjatija reshenij operatora linii nepreryvnoj vulkanizacii kabel'noj produkcii [Mathematical and algorithmic support for the decision support system for the operator of a continuous vulcanization line for cable products]. *Kandidatskaya dissertatsiya, Permskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet* [Candidate dissertation, Permskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet]. https://pstu.ru/files/2/file/02_Proekt_dissertacii_Dyatlov_IYA_1912_23.pdf
19. Du, B., Li, Z., Bai, H., Li, Q., Zheng, C., Liu, J., Qiu, F., Fan, Z., Hu, H., Chen, L. (2022). Mechanical property of long glass fiber reinforced polypropylene composite: From material to car seat frame and bumper beam. *Polymers* 14, 1814. <https://doi.org/10.3390/polym14091814>
20. Du, Y., Jiang, X., Jin, Y., Wang, F., Chi, Y., Buekens, A. (2017). TG-DSC and FTIR study on pyrolysis of irradiation cross-linked polyethylene. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19(4), 1400–1404. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0530-z>
21. Edwards, Y., Tasdemir, Y., Isacson, U. (2006). Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures. *Cold Regions Science and Technology* 45(1), 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2006.01.002>
22. Fomicheva, T.A., Serenko, O.A. (2023). Vlijanie temperatury na mehanicheskie svoystva vysokonapolnennykh kompozitov na osnove polipropilena i izmel'chjonnoj rezinovoj kroshki [Effect of temperature on the mechanical properties of highly filled composites based on polypropylene and ground rubber crumb]. *Zhurnal NII jelementoorganicheskikh soedinenij im. A.N. Nesmejanova RAN* [Journal of the A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences] 5(4), 107–112. <https://doi.org/10.32931/io.2220a>
23. Goto, T., Yamazaki, T. (2004). Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol. *Hitachi Cable Review* 23, 24–27. <https://doi.org/10.1109/IPADM.2003.1218644>
24. Goto, T., Yamazaki, T., Sugeta, T., Okajima, I., Sako, T. (2008). Selective decomposition of the siloxane bond constituting the crosslinking element of silane-crosslinked polyethylene by supercritical alcohol. *Journal of Applied Polymer Science* 109(1), 144–151. <https://doi.org/10.1002/app.27928>
25. Gu, J., Xu, H., Wu, C. (2020). Super-Toughened Heat-Resistant Poly(lactic acid) Alloys By Tailoring the Phase Morphology and the Crystallization Behaviors. *Polymer Alloy Laboratory, East China University of Science and Technology* 58, 500–509. <https://doi.org/10.1002/pol.20190090>
26. Gunewardena, A., Gilbert, M. (2008). Peroxide crosslinking of rigid polyvinylchloride. *Journal of Vinyl & Additive Technology* 14(3), 92–98. <https://doi.org/10.1002/vnl.20158>
27. Hamidi, N., Tebyanian, F., Massoudi, R., Whitesides, L. (2013). Pyrolysis of household plastic wastes. *British Journal of Applied Science & Technology* 3(3), 417–439. <https://doi.org/10.9734/BJAST/2014/1984>

28. Han, I.S., Choi, H.J., Lee, H.K. (2023). Polypropylene/polyolefin elastomer composites with enhanced impact strength: The effect of rubber domain size on toughness. *Journal of Polymer Research* 30(6), 224–284. <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03615-8>
29. Haque, S.M., Ardila-Rey, J.A., Umar, Y., Mas'ud, A.A., Muhammad-Sukki, F., Jume, B.H., Rahman, H., Bani, N.A. (2021). Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies* 14(10), 2758. <https://doi.org/10.3390/en14102758>
30. Harada, M. (2016). Analytical methods for vulcanized rubbers. *International Polymer Science and Technology* 43(2), 45–54. <https://doi.org/10.1177/0307174X1604300212>
31. Havva, B.B., Ramisa, Y., Yavuz, E.Y., Burcu, S.O. (2024). Sustainable engineered designs and manufacturing of waste derived graphenes reinforced polypropylene composite for automotive interior parts. *ACS Omega* 9, 34530–34543. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01234>
32. Hong, S.M., Cho, H.K., Koo, C.M., Lee, J.H., Park, W.Y., Lee, H.S., Lee, Y.W. (2008). Decrosslinking of cross-linked polyethylene using supercritical methanol. *Korean Chemical Engineering Research* 46(1), 63–68.
33. Husnutdinova, G.R., Zemskij, D.N., Karmanova, O.V. (2017). Polimerizacija vinilovyh monomerov v prisutstvii iniciirujushhih kataliticheskikh kompleksov «tretichnye oksipropilirovannye aromatcheskie aminy – perekis' benzoila». [Polymerization of vinyl monomers in the presence of initiating catalytic complexes “tertiary oxypropylated aromatic amines – benzoyl peroxide”]. *Vestnik VGUI [Proceedings of VSUET]* 79(2), 165–169. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-165-169>
34. Jamnongkan, T., Intraramongkol, N., Samoechip, W., Potiyaraj, P., Mongkholrattanasit, R., Jamnongkan, P., Wongwachirakorn, P., Sugimoto, M.I., Huang, C.F. (2022). Towards a circular economy: Study of the mechanical, thermal, and electrical properties of recycled polypropylene and their composite materials. *Polymers* 14, 5482–5511. <https://doi.org/10.3390/polym14245482>
35. Jha, S., Akula, B., Enyima, H., Novak, M., Amin, V., Liang, H. (2024). Biodegradable biobased polymers: A review of the state of the art, challenges, and future directions. *Polymers* 16(16), 2262. <https://doi.org/10.3390/polym16162262>
36. Kayandan, S., Doshi, B.-N., Oral, E. (2018). Surface cross-linked ultra-high molecular weight polyethylene by emulsified diffusion of dicumyl peroxide. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 106B, 1517–1523. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33957>
37. Khan, T., Irfan, M. S., Ali, M., Dong, Y., Ramakrishna, S., Umer, R. (2021). Insights to low electrical percolation thresholds of carbon-based polypropylene nanocomposites. *Carbon* 176, 602–631. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.01.01.158>
38. Korelin, A.A., Trufanova, N.M. (2024). Analiz vlijaniya kineticheskikh i teplofizicheskikh harakteristik polijetilena pri modelirovanii processa peroksidnoj sshivki izoljatsii. [Analysis of the influence of kinetic and thermophysical characteristics of polyethylene in modeling the process of peroxide crosslinking of insulation]. *Jeletrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija. Vestnik PNIPU [Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems. Bulletin of PNIPU]* 50, 5–22. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2024.2.01>
39. Korelin, A.A., Trufanova, N.M. (2024). Analysis of the influence of kinetic and thermophysical characteristics of polyethylene in the modeling of the peroxide crosslinking process of insulation. *PNRPU Bulletin: Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems* 32(1), 112–128. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2024.2.01>
40. Korelin, A.A., Djatlov, I.Ja., Trufanova, N.M. (2020). Matematicheskaja model' i chislennyj analiz processa peroksidnoj sshivki izoljatsii kabelej na srednee naprjazhenie [Mathematical model and numerical analysis of the peroxide crosslinking process of medium-voltage cable insulation]. *Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehniceskij universitet [Perm National*

- Research Polytechnic University] 35(3), 119–132. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.3.08>
41. Korelin, V.K., Kalugina, O.S., Petrov, K.V. (2016). Termicheskie i termomechanicheskie osobennosti peroksidno-sshitogo polijetilena vysokoj plotnosti [Thermal and thermomechanical features of peroxide-crosslinked high-density polyethylene]. *Izvestiya SPbGTI(TU). Seriya Khimia i tekhnologiya vysokomolekulyarnykh soedinenij* [Proceedings of St. Petersburg State Institute of Technology (TU). Series Chemistry and Technology of High-Molecular Compounds] 33, 30–32.
 42. Kovalenko, D.V., Zhivnickij, N.S. (2025). Ispol'zovanie pererabotannogo plastika v dorozhnoj odezhde [Use of recycled plastic in road pavement]. *Vestnik nauki* [Bulletin of Science] 3(84), 387–393. <https://vestnik-nauki.com/article/21993>
 43. Kruželák, J., Kvasničáková, A., Hudec, I. (2020). Peroxide curing systems applied for cross-linking of rubber compounds based on SBR. *Ain Shams Engineering Journal* 79 (5), 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.05.001>
 44. Lee, K.H., Shin, D.H. (2006). A comparative study of liquid product on non-catalytic and catalytic degradation of waste plastics using spent FCC catalyst. *Korean Journal of Chemical Engineering* 2, 209–215. <https://doi.org/10.1007/BF02705718>
 45. Lenfeld, P., Brdlík, P., Borůvka, M., Běhálek, L., Habr, J. (2020). Effect of radiation crosslinking and surface modification of cellulose fibers on properties and characterization of biopolymer composites. *Polymers* 12(12), 3006. <https://doi.org/10.3390/polym12123006>
 46. Likozar, B., Krajnc, M. (2011). Kinetic modeling of the peroxide cross-linking of polymers: From a theoretical model framework to its application for a complex polymer system. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 50(2), 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.12.007>
 47. Liu, S., Zhang, R., Fu, C., Zheng, T., Xue, P. (2025). Changes in heat resistance and mechanical properties of peroxide cross-linking HDPE: Effects of compounding cross-linkers. *Polymers* 17(4), 535. <https://doi.org/10.3390/polym17040535>
 48. Liu, S.-Q., Gong, W.-G., Zheng, B.-C. (2014). The effect of peroxide cross-linking on the properties of low-density polyethylene. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics* 53(1), 67–77. <https://doi.org/10.1080/022348.2013789360>
 49. López-Uriónabarrenechea, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Laresgoiti, M.F., Adrados, A., Aranzabal, A. (2011). Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud. *Applied Catalysis B: Environmental* 104(3-4), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.030>
 50. Makarova, M.A., Malygina, A.S., Pyshnograj, G.V., Rudakov, G.O. (2020). Modelirovanie reologicheskikh svoystv rasplavov polijetilenov pri ih odnoosnom rastjazhenii. [Modeling of rheological properties of polyethylene melts under uniaxial tension]. *Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred* [Computational Mechanics of Continua] 13(1), 73–82. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.1.6>
 51. Mamedli, U.M. (2018). Sshivka i napolnennye kompozity na osnove poliolefinov. [Crosslinking and filled composites based on polyolefins]. *Izvestija vuzov. Seriya Himija i himicheskaja tehnologija* [Russian Journal of Physical Chemistry and Chemical Technology] 61(6), 4–16. <https://doi.org/10.6060/tcct.20186106.5656>
 52. Marcilla, A., Ruiz-Femenia, R., Hernández, J., García-Quesada, J.C. (2006). Thermal and catalytic pyrolysis of crosslinked polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 76(1–2), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.12.004>
 53. Mauri, M., Hofmann, A.I. (2020). Click chemistry-type crosslinking of a low-conductivity polyethylene copolymer ternary blend for power cable insulation. *Polymer International* 69, 404–412. <https://doi.org/10.1002/pi.5966>

54. Mhaske, S.T., Mestry, S.U., Patil, D.A. (2022). Cross-linking of polymers by various radiations: Mechanisms and parameters. *In Radiation technologies and applications in materials science*, 1–28. <https://doi.org/10.1201/9781003321910-1>
55. Mo, S.J., Zhang, J., Liang, D., Chen, H.Y. (2013). Study on pyrolysis characteristics of cross-linked polyethylene material cable. *Procedia Engineering* 52, 588–592. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.190>
56. Mohebbi, A., Mighri, F., Rodrigue, D. (2015). Current issues and challenges in polypropylene foaming: A review. *Cellular Polymers* 34(6). <https://doi.org/10.1177/026248931503400602>
57. Molchanov, V.I., Karmanova, O.V., Tihomirov, S.G. (2013). Modelirovanie kinetiki vulkanizacii polidienov. [Modeling the kinetics of polydiene vulcanization]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tehnologij* [Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies] 1(55), 142–145. <https://core.ac.uk/download/pdf/143993731>
58. Molchanov, V.I., Karmanova, O.V., Tihomirov, S.G. (2014). Modelirovanie kinetiki neizotermicheskoy vulkanizacii massivnyh rezinovyh izdelij. [Modeling of the kinetics of non-isothermal vulcanization of bulk rubber products]. *Trudy BGTU. Himija, tehnologija organicheskikh veshhestv i biotekhnologija* [Proceedings of BSTU. Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology] 4(168), 100–104.
59. Novikov, G.K. (2017). Influence of radiation crosslinking in an electric gas discharge on the mechanical strength of polyethylene cable insulation. *Electricity* 12, 43–46. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2017-12-43-46>
60. Park, H., Park, J., Jung, S.Y. (2019). Measurements of velocity and temperature fields in natural convective flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 139(2), 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.022>
61. Polujanovich, N.K., Bur'kov, D.V., Dubjago, M.N., Kachelaev, O.V. (2023). Analiz jelektromagnitnogo polja v kabel'nyh sistemah s izoljaciej iz polimernyh materialov [Electromagnetic field analysis in cable systems with polymer insulation]. *Izvestija JuFO. Tekhnicheskie nauki. Jelektronika, nanotekhnologii i priborostroenie* [Proceedings of JFO. Technical sciences. Electronics, nanotechnology and instrumentation] 3, 251–266. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-3-251-266>
62. Pzybysz, M., Hejna, A., Haponiuk, J., Formela, K. (2019). Structural and thermo-mechanical properties of poly(ϵ -caprolactone) modified by various peroxide initiators. *Polymers* 11(7), 1101. <https://doi.org/10.3390/polym11071101>
63. Ramaswamy, K., Nagaprasad, N., Ramaswamy, S. (2025). Polymer nanocomposites: Innovations in material design and applications. *In Advances in Polymer Nanocomposites*, 28–40. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6326-3.ch008>
64. Ren, Y., Sun, X., Chen, L., Li, Y., Sun, M., Duan, X., Liang, W. (2021). Structures and impact strength variation of chemically crosslinked high-density polyethylene: Effect of crosslinking density. *RSC Advances* 11, 6791–6797. <https://doi.org/10.1039/D0RA10365A>
65. Ruslan, M.F., Youn, D.J., Aarons, R. (2021). Numerical analysis of a continuous vulcanization line to enhance CH₄ reduction in XLPE-insulated cables. *Materials* 14(4), 1018. <https://doi.org/10.3390/ma14041018>
66. Ryzhikova, I.G., Volkov, A.M., Bauman, N.A., Kazakov, Ju.M., Vol'fson, S.I. (2013). Issledovanie fiziko-mehanicheskikh svojstv smesej PP/SKJePT, modifitsirovannyh peroksidom i sistemoj peroksid/TMPTA. [Study of physico-mechanical properties of PP/SKJEPT blends modified with peroxide and peroxide/TMPTA system]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University] 16(10), 134–137.
67. Sa, J., Kown, Y., Lee, J., Min, S. (2021). A study on applying phenol foam insulation material as pipe lagging material. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 21(6), 125–131. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.6.125>

68. Sa, J., Kown, Y., Lee, J., Min, S. (2021). A study on applying phenol foam insulation material as pipe lagging material. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 21(6), 125–131. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.6.125>
69. Sadirova, S.N. (2022). Studying the properties of crosslinked polyethylene. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences* 3(1), 56–60. <https://doi.org/10.24412/2181-144X-2022-1-56-60>
70. Sahyoun, J., Crepet, A., Gouanve, F. (2016). Diffusion mechanism of byproducts resulting from the peroxide crosslinking of polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science* 134(44525), 1–11. <https://doi.org/10.1002/app.44525>
71. Santana, R.C., Manrich, S. (2002). Studies on thermo-mechanical properties of post-consumer high impact polystyrene in five reprocessing steps. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 18(2), 99–110. <https://doi.org/10.1177/147776060201800202>
72. Schirmer, J., Kim, J.S., Klemm, E. (2001). Catalytic degradation of polyethylene using thermal gravimetric analysis and a cycled-spheres-reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 60(2), 205–217. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00197-2)
73. Serrano, D.P., Aguado, J., Escola, J.M., Garagorri, E. (2003). Performance of a continuous screw kiln reactor for the thermal and catalytic conversion of polyethylene–lubricating-oil base mixtures. *Applied Catalysis B: Environmental* 44, 95. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00024-9)
74. Shirvanimoghaddam, K., Balaji, K.V., Yadav, R., Zabihi, O., Ahmadi, M., Adetunji, P., Naebe, M. (2021). Balancing the toughness and strength in polypropylene composites. *Composites Part B: Engineering* 223, 109121–109122. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109121>
75. Sipaut, C.S., Sims, G.L., Ariff, Z.M. (2008). Crosslinking of polyolefin foam II. Applicability of parameters to assess crosslinking/foam density relationships. *Cellular Polymers* 27(1), 11–26. <https://doi.org/10.1177/026248930802700102>
76. Sircar, A.K., Wells, J.L. (1982). Thermal conductivity of elastomer vulcanizates by differential scanning calorimetry. *Rubber Chemistry and Technology* 55(1), 191–207. <https://doi.org/10.5254/1.3535866>
77. Skroznikov, S.V., Ljamkin, D.I., Zhemerikin, A.N., Kobec, A.V., Cherkashin, P.A., Cherepennikov, S.V. (2011). Modification of the peroxide crosslinking method of polyethylene for cable technology. *Advances in Chemistry and Chemical Technology* 61(1), 47–53
78. Takuma, K., Uemichi, Y., Sugioka, M., Ayame, A. (2001). Production of aromatic hydrocarbons by catalytic degradation of polyolefins over H-gallosilicate. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 40(4), 1076–1082. <https://doi.org/10.1021/ie000638j>
79. Tamboli, S.M., Mhaske, S.T., Kale, D.D. (2004). Crosslinked polyethylene. *Indian Journal of Chemical Technology* 11, 853–864.
80. Tan, H., Guo, X., Tan, H., Zhang, Q., Liu, C., Shen, P., Qiao, L., Yan, X., Jing, L. (2022). Crystallization and mechanical properties of carbon nanotube/continuous carbon fiber/metallocene polypropylene composites. *Materials Research Express* 9, 1432–1433. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac46e6>
81. Tanjung, F.A., Kuswardani, R.A., Idumah, C.I., Siregar, J.P., Karim, A. (2022). Characterization of mechanical and thermal properties of esterified lignin modified polypropylene composites filled with chitosan fibers. *Polymers and Polymer Composites* 30, 1–11.
82. Timakov, E.A., Panov, Ju.T. (2020). Peroksidnaja sshivka polijetilena v prisutstvii triallilcianurata. [Peroxide crosslinking of polyethylene in the presence of triallyl cyanurate]. *Butlerovskie Soobshheniya [Butlerov Communications]* 61(1), 40–47. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/20-61-1-40>

83. Tokuda, S., Horikawa, S., Negishi, K., Uesugi, K., Hirukawa, H. (2003). Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene. *Furukawa Review* 23, 88–93.
84. Tsai, C.-Y., Zhang, T., Zhao, M., Chang, C.-S., Sue, H.-J. (2021). Preparation of thermally conductive but electrically insulated polypropylene containing copper nanowire. *Polymer* 23, 124317–124322. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.03.017>
85. Tzelepis, D.A., Khoshnevis, A., Zayernouri, M., Ginzburg, V.V. (2023). Polyurea–graphene nanocomposites-the influence of hard-segment content and nanoparticle loading on mechanical properties. *Polymers* 15(22), 4434. <https://doi.org/10.3390/polym15224434>
86. Uyor, U.O., Ibhaddode, A.O. Ekpe, U.J., Okoye, C.I. (2023). A review of recent advances on the properties of polypropylene–carbon nanotubes composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 36(9), 3737–3770. <https://doi.org/10.1177/08927057221077868>
87. Varga, L.J., Barany, T. (2021). Development of recyclable, lightweight polypropylene-based single polymer composites with amorphous poly-alpha-olefin matrices. *Composites Science and Technology* 201, 108535–108556. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108535>
88. Wakimoto, S. (1982). *Fine spherical polymer particles and process for the preparation thereof* (U.S. Patent No. 4,360,611). U.S. Patent and Trademark Office.
89. Wasti, S., Kore, S., Yeole, P., Tekinalp, H., Ozcan, S., Vaidya, U. (2022). Bamboo fiber reinforced polypropylene composites for transportation applications. *Polymeric and Composite Materials* 9, 3191–3126. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.967512>
90. Watanabe, S., Komura, K., Nagaya, S., Morita, H., Nakamoto, T., Hirai, S., Aida, F. (2003). Development of cross-linked polymer material recycling technology by supercritical water. In *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* 2, 595–598. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2003.1218487>
91. Wehtje, E.W., Feist, J.D., Hwang, M.C. (1996). Apparatus for manufacturing expandable polystyrene (EPS) pellets (U.S. Patent No. 6365275B1). U.S. Patent and Trademark Office).
92. Wu, J., Wu, Z.L., Yang, H., Zheng, Q. (2014). Crosslinking of polyethylene using peroxides. *RSC Advances* 4, 54801–54812. <https://doi.org/10.1039/C3RA46159B>
93. Yang, L., Xiang, M., Zhu, Y., Yang, Z. (2023). Influences of carbon nanotubes/polycarbonate composite on enhanced local marking properties of polypropylene. *Polymer Bulletin* 8, 1321–1333. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04123-3>
94. Yeoh, O.H. (2012). Mathematical modeling of vulcanization characteristics. *Rubber Chemistry and Technology* 85(3), 482–492. <https://doi.org/10.5254/rct.12.87982>
95. Zhang, C., Jiang, Y., Li, S., Huang, Z., Zhan, S.-K., Ma, N., Cai, F.-K. (2022). Recent trends in the processing of modified polypropylene composites using phosphorus-containing flame retardants. *Heliyon* 8, e11225. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11225>
96. Zhang, Z., Liu, J. (2025). Recycling of cross-linked polymers: New advances and applications. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics* 10(1), 1–34. <https://doi.org/10.1002/polb.24220>
97. Zhao, W., Kundu, C.K., Li, Z., Li, X., Zhang, Z. (2021). Flame retardant treatments for polypropylene: Strategies and recent advances. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 145, 106382. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106382>
98. Zhigalov, D.V. (2010). Mify o trubah iz sshitogo polijetilena. [Myths about crosslinked polyethylene pipes]. *Voprosy jekspluatacii truboprovodov*, [Vesta Region LLC. Valtec], 295–299. <https://www.valtec.ru/articles/miify-o-trubah-iz-sshitogo-polietilena>
99. Zyuzin, A.M., Karpeev, A.A., Igonchenkova, K.E. (2023). Influence of carbon black content on the current-voltage characteristics of polymer composites. *Technical Physics Letters* 49(13), 21–24.
100. Zyuzin, A.M., Karpeev, A.A., Yantsen, N.V. (2022). Influence of carbon black content on the temperature dependence of the electrical conductivity of a polymer composite. *Technical Physics Letters* 48(1), 31–35 <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.01.51879.18965>.

Полипропилен негізінде радиациялық және пероксидтік әдістермен композиттерді алу: шолу және салыстырмалы талдау

Арайлым Турсынова, Лязат Толымбекова, Гайни Сейтенова, Гаухар Тажкенова, Зарина Елемесова

Аңдатпа. Осы мақалада полипропилен композиттерін модификациялаудың екі негізгі әдісі - радиациялық және пероксидтік тігілуді жан-жақты шолу және салыстырмалы талдау ұсынылған. Жоғары физика-химиялық қасиеттерге ие полипропилен құрылыс, автомобиль, электротехника және басқа да салаларда кеңінен қолданылады. Алайда оның термотөзімділігін, беріктігін және ұзақ мерзімділігін арттыру қажеттілігі макромолекулалық құрылымын қосымша модификациялауды талап етеді. Қарастырылып отырған тігілген құрылымдарды қалыптастыру әдістері материалдың пайдалану қасиеттерін едәуір жақсартатын кеңістіктік торлы құрылымның түзілуін қамтамасыз етеді. Мақалада торлы құрылым түзілуінің механизмдері, процесс параметрлерінің тігілу тиімділігіне әсері талданады және алынған композиттердің бірқатар физика-механикалық және термиялық сипаттамалары бойынша салыстырмасы келтіріледі. Қолдану саласының ерекшелігіне байланысты әдісті таңдаудың өзектілігі негізделіп, бұл полимер инженериясы саласындағы болашақ зерттеулердің перспективалылығын көрсетеді. Модификацияланған композиттердің әлеуетті қолдану салалары, оның ішінде жоғары беріктік пен қоршаған орта әсеріне төзімділік талап етілетін жоғары технологиялық салаларда қолданылуы қарастырылады. Сонымен қатар, тігілген полипропилендерді өнеркәсіпке енгізудің экологиялық және экономикалық аспектілері баяндалады. Технологияларды ауқымдандыру, сондай-ақ алынған шешімдерді қолданыстағы өндірістік процестерге интеграциялау мәселелеріне ерекше назар аударылады. Сонымен бірге, тігілу дәрежесін бақылау мен алынған материалдарды стандарттау қажеттілігімен байланысты қиындықтар талданады. Қорытындылай келе, полипропилен композиттерінің қажетті қасиеттеріне қол жеткізу үшін оңтайлы тігілу әдісін таңдаудың маңыздылығы атап өтіледі, бұл олардың нарықтағы бәсекеге қабілеттілігіне елеулі әсер етуі мүмкін. Бұл технологияларды өнеркәсіптік өндірісте сәтті енгізудің мысалдары келтірілген.

Түйін сөздер: полипропилен, полимердің түйіндесуі, радиациялық түйіндесу, пероксидтік түйіндесу, композиттер, полимерлік материалдар, физика-химиялық қасиеттер, полимерлерді модификациялау, құрылымдық өзгерістер, өндірістік қолдану.

Radiation and peroxide methods for composite preparation based on polypropylene: a review and comparative analysis

Arailym Tursynova, Lyazat Tolymbekova, Gaini Seitenova, Gaukhar Tazhkenova, Zarina Elemessova

Abstract: This article presents a comprehensive review and comparative analysis of two key methods for modifying polypropylene composites—radiation and peroxide crosslinking. Polypropylene, with its high physicochemical properties, is widely used in construction, automotive, electrical engineering, and other industries. However, the need to improve its thermal resistance, strength, and durability necessitates additional modification of its macromolecular structure. The crosslinking methods under consideration enable the formation of a three-dimensional network structure, which significantly enhances the performance characteristics of the

material. The article analyzes the mechanisms of network structure formation, the influence of process parameters on crosslinking efficiency, and provides a comparison of the resulting composites in terms of various physical, mechanical, and thermal properties. The relevance of choosing a method based on the specific end-use application is substantiated, emphasizing the potential for further research in the field of polymer engineering. Potential application areas for the modified composites are discussed, including their use in high-tech industries where enhanced strength and resistance to environmental factors are required. Additionally, the ecological and economic aspects of implementing crosslinked polypropylene in industry are addressed. Particular attention is given to issues of technology scale-up and integration of developed solutions into existing manufacturing processes. At the same time, challenges related to the control of the degree of crosslinking and the need for standardization of the resulting materials are analyzed. In conclusion, the importance of selecting the optimal crosslinking method to achieve the desired properties of polypropylene composites is highlighted, as it can significantly influence their market competitiveness. Examples of successful industrial implementation of these technologies are provided.

Keywords: polypropylene, polymer crosslinking, radiation crosslinking, peroxide crosslinking, composites, polymer materials, physicochemical properties, polymer modification, structural changes, industrial applications.