

## ХИМИЯ

Научная статья  
УДК 541.64

### Модификация и переработка полиэтилена: современные подходы и перспективы развития

Альбина Мухамедовна Алтуева<sup>1</sup>, Жамиля Хусейновна Токумаева<sup>2</sup>, Марат Хамидович Алтуев<sup>3</sup>,  
Нурали Иналович Машуков<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

<sup>1</sup>k-a.albina@mail.ru

<sup>2</sup>ztokumayeva@bk.ru

<sup>3</sup>k-a.albina@mail.ru

<sup>4</sup>mnurali@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления химической, физической и композитной модификации полиэтилена, включая функционализацию, создание нанокompозитов и использование бионаполнителей. Проанализированы современные технологии переработки отходов ПЭ: механический рециклинг, термическая переработка (пиролиз), а также перспективные методы химической деполимеризации. Показано, что интеграция модификации и рациональной переработки позволяет не только улучшить свойства материала, но и снизить его экологический след. Предложены направления дальнейших исследований, направленные на повышение качества вторичного полиэтилена и расширение областей его применения.

**Ключевые слова:** полиэтилен, модификация, переработка, нанокompозиты, вторичное сырьё, пиролиз, функционализация, устойчивое развитие

**Для цитирования:** Алтуева А.М., Токумаева Ж.Х., Алтуев М.Х., Машуков Н.И. Модификация и переработка полиэтилена: современные подходы и перспективы развития // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 1. С. 48–52.

## CHEMISTRY

Original article

### Modification and processing of polyethylene: modern approaches and development prospects

Albina M. Altueva<sup>1</sup>, Zhamilya Kh. Tokumaeva<sup>2</sup>, Marat Kh. Altuev<sup>3</sup>, Nurali I. Mashukov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Kabardino-Balkarian State University, Nal'chik, Russia

<sup>1</sup>k-a.albina@mail.ru

<sup>2</sup>ztokumayeva@bk.ru

<sup>3</sup>k-a.albina@mail.ru

<sup>4</sup>mnurali@mail.ru

**Abstract.** Examines the main approaches to chemical, physical, and composite modification of polyethylene, including functionalization, the creation of nanocomposites, and the use of biofillers. Modern PE waste recycling technologies are analyzed, including mechanical recycling, thermal processing (pyrolysis), and promising methods of chemical depolymerization. It is shown that integrating modification and rational recycling not only improves the material's properties but also reduces its environmental footprint. Directions for further research aimed at improving the quality of recycled polyethylene and expanding its applications are proposed.

**Keywords:** polyethylene, modification, recycling, nanocomposites, secondary raw materials, pyrolysis, functionalization, sustainable development

**For citation:** Altueva A.M., Tokumayeva Zh.Kh., Altuev M.Kh., Mashukov N.I. Modification and Recycling of Polyethylene: Modern Approaches and Development Prospects // Proceedings Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(1):48–52.

### Введение

Полиэтилен (ПЭ) – термопластичный полимер, занимающий лидирующее положение среди синтетических полимеров по объёму производства. По данным Plastics Europe, в 2023 г. мировое производство ПЭ превысило 110 млн тонн [1]. Широкое применение ПЭ в упаковке, строительстве, сельском хозяйстве и электротехнике обусловлено его высокой химической стойкостью, влагонепроницаемостью, простотой переработки и низкой стоимостью.

Вместе с тем традиционный ПЭ обладает рядом существенных недостатков: низкой поверхностной энергией (плохая адгезия), чувствительностью к ультрафиолетовому излучению, ограниченной термостойкостью и, что особенно актуально, крайне медленной биodeградацией (до 500 лет в природных условиях) [2]. Ежегодно в мире образуется более 35 млн тонн отходов ПЭ, лишь 15–20 % из которых подвергается вторичной переработке (рисунок 1) [3].

В условиях реализации принципов циркулярной экономики и требований экологической безопасности возрастает необходимость в разработке комплексных решений, сочетающих модификацию ПЭ для улучшения его свойств и эффективные методы его утилизации. Цель настоящей работы – систематизировать современные подходы к модификации и переработке полиэтилена, а также определить перспективные направления исследований в данной области.



Рисунок 1 – Области применения полиэтилена

### Экспериментальная часть

Модификация полиэтилена (ПЭ) направлена на улучшение его физико-химических и механических свойств, включая повышение прочности, теплостойкости и стойкости к ультрафиолету. Основные методы включают физическое смешение с добавками/полимерами, химическое сшивание (силан, пероксиды, облучение), сополимеризацию, а также поверхностную обработку (плазма, коронный разряд) для улучшения адгезии.

**Химическая модификация.** Наиболее распространённый способ – сополимеризация этилена с полярными мономерами (винилацетат, акриловая кислота, метакрилаты), что приводит к образованию сополимеров типа этиленвинилацетата (EVA) или этилен-метилакрилата (EMA). Такие материалы обладают повышенной эластичностью, прозрачностью и адгезией к металлам и краскам [4].

Альтернативный подход – прививочная полимеризация (grafting), при которой на макромолекулы ПЭ прививаются функциональные группы ( $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ) с использованием пероксидов или радиационного инициирования. Это позволяет улучшить совместимость с наполнителями и повысить адгезию без значительного изменения объёмных свойств (рисунок 2) [5].

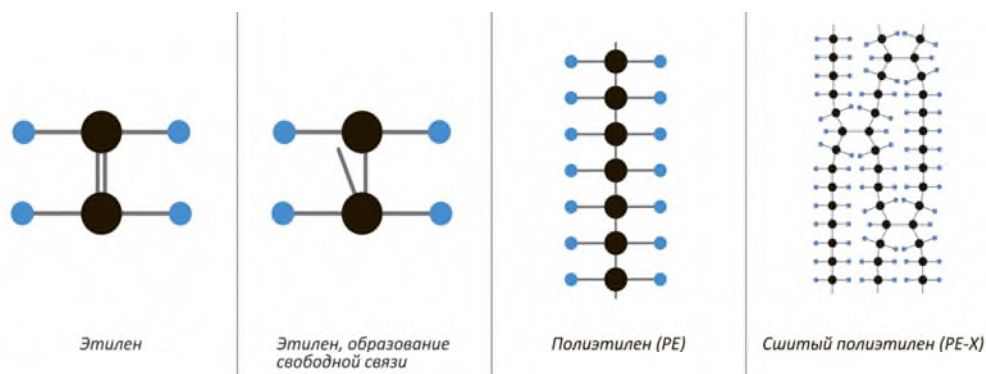


Рисунок 2 – Схема полимеризации этилена и сшивки полиэтилена: от мономера к трёхмерной сетчатой структуре (PE-X)

**Физическая модификация.** Поверхностная обработка (коронный разряд, плазменная активация, УФ-облучение) используется для увеличения поверхностной энергии ПЭ, что необходимо для последующей печати, ламинирования или склеивания. Такие методы не влияют на внутреннюю структуру материала, но значительно расширяют его функциональность (рисунок 3) [6].

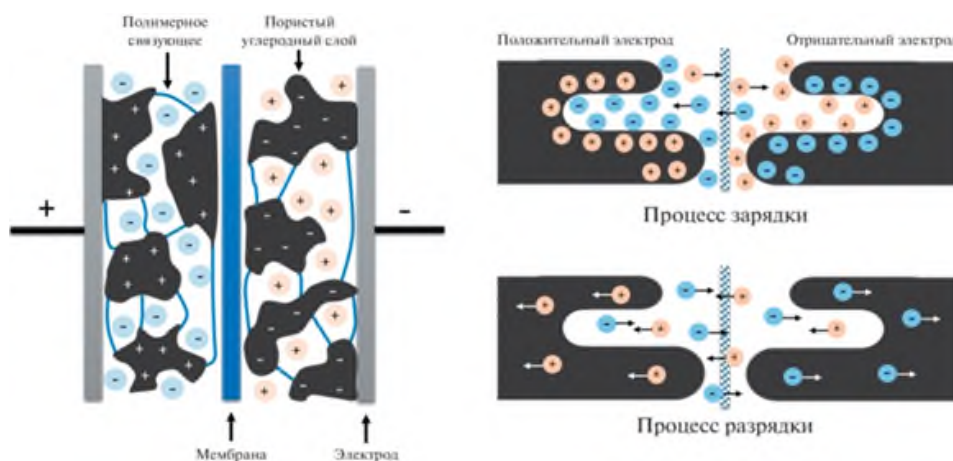


Рисунок 3 – Схема устройства суперконденсатора и процессов, приводящих к образованию двойного электрического слоя

Создание композитов на основе ПЭ с различными наполнителями является одним из наиболее перспективных направлений. Традиционные минеральные наполнители (мел, тальк) снижают стоимость и улучшают жёсткость. Более эффективны наноразмерные добавки: графен, углеродные нанотрубки, наноглина (рисунок 4). Например, введение 2 масс. % оксида графена в ПНД повышает предел прочности при растяжении на 28 % и температуру тепловой деформации на 12 °С [7].

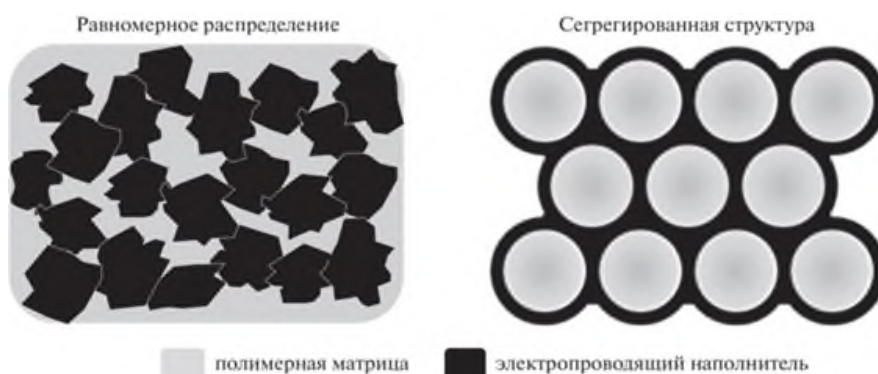


Рисунок 4 – Схема структуры композитов равномерным

распределением наполнителя и неравномерным распределением

Также активно развиваются композиты с бионаполнителями (древесная мука, шелуха риса, лён), что снижает экологический след и способствует утилизации сельскохозяйственных отходов [8].

**Технологии переработки полиэтилена.** Механическая переработка является наиболее экономически выгодным и широко применяемым методом. Процесс включает сортировку, мойку, дробление, экструзию и гранулирование. Полученный вторичный ПЭ (rPE) используется в производстве плёнок, труб, контейнеров и других изделий низкой ответственности. Основные ограничения – деградация полимера при многократной переработке (снижение молекулярной массы, изменение цвета) и загрязнение примесями (рисунки 5) [9].

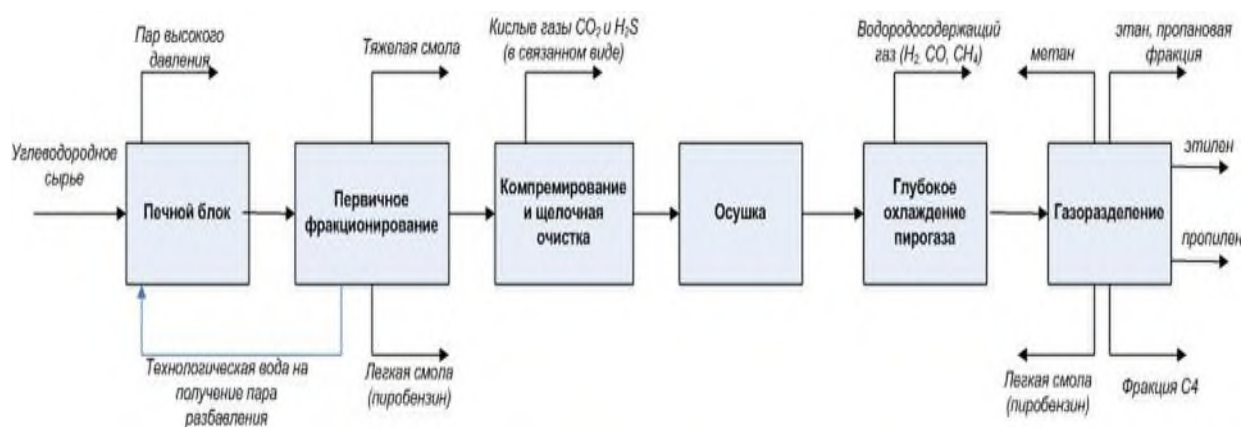


Рисунок 5 – Блок-схема этиленового производства

**Термическая переработка.** Пиролиз – термическое разложение ПЭ в инертной атмосфере при 400–600 °С – позволяет получать жидкие углеводороды (аналог дизельного топлива), газ и воск. Современные каталитические установки обеспечивают выход жидкого продукта до 85 % [10]. Однако высокая энергоёмкость и необходимость очистки продуктов ограничивают масштаб внедрения.

**Химическая переработка.** Хотя ПЭ не поддаётся классической деполимеризации, новые каталитические системы (цеолиты, MOF-материалы) позволяют селективно расщеплять его до мономеров или ценных химикатов ( $\alpha$ -олефинов, ароматических соединений). Этот подход находится на стадии лабораторных исследований, но демонстрирует высокий потенциал.

**Биологическая переработка.** Традиционный ПЭ является биоразлагаемым. В настоящее время разрабатываются его модифицированные версии – например, с добавками прокатализаторов окисления (ОХО-биодegradируемые ПЭ). Однако их экологическая безопасность оспаривается, так как они распадаются на микропластик, а не на углекислый газ и воду [10].

### Обсуждение и перспективы

Интеграция модификации и переработки открывает новые возможности. Например, функционализированный ПЭ легче поддаётся повторной переработке благодаря улучшенной совместимости с другими полимерами. Напротив, вторичный ПЭ может быть усилен нанонаполнителями для восстановления утраченных свойств.

Особый интерес представляет концепция «дизайна для переработки»: создание ПЭ-материалов с заранее заложенной возможностью лёгкой утилизации – например, через использование совместимых сополимеров или легко отделяемых многослойных структур.

#### Перспективные направления исследований:

- разработка «умных» ПЭ-композитов с контролируемым сроком службы;
- создание высокоэффективных каталитических систем для химической переработки;
- стандартизация методов оценки качества вторичного ПЭ;
- интеграция биоэтилена (из возобновляемого сырья) в производство ПЭ.

### Выводы

Модификация и переработка полиэтилена являются взаимосвязанными и стратегически важными направлениями в современном материаловедении. Химические, физические и композитные методы модификации позволяют адаптировать ПЭ под специфические требования, расширяя его применение. В то же время развитие технологий вторичной переработки – от механического рециклинга до передовых методов химического разложения – способствует снижению экологической нагрузки и переходу к циркулярной экономике.

Только комплексный подход, сочетающий инновационную модификацию, рациональную переработку и ответственное потребление, позволит обеспечить устойчивое будущее для одного из самых востребованных полимеров человечества.

### Библиография

1. PlasticsEurope. Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE) [Электронный ресурс]. Brussels: PlasticsEurope, 2023. Режим доступа: <https://plasticseurope.org>.
2. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. V. 62, N 8. P. 1596–1605.
3. Ellen MacArthur Foundation, World Economic Forum, McKinsey & Company. The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics [Электронный ресурс]. Cologny/Geneva: World Economic Forum, 2016. 100 с. Режим доступа: <https://www3.weforum.org>.
4. Петров А.В., Кузнецов И.С. Механическая переработка вторичного полиэтилена: влияние многократной экструзии на свойства // *Полимерные материалы*. 2021. № 3. С. 45–52.
5. Мустафин А.Г., Хайруллин Р.Р. Функционализация полиэтилена прививкой малеинового ангидрида // *Журнал прикладной химии*. 2020. Т. 93, № 7. С. 1023–1030.
6. Казарян М.А., Левчук С.В. Переработка полимерных отходов: современное состояние и перспективы // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2022. Т. 65, № 4. С. 5–18.
7. Gabara W., Porejko S. Grafting of maleic anhydride on polyethylene. I. Mechanism of grafting in the presence of oxygen // *Journal of Polymer Science Part A*. 1967. V. 5. P. 795–806.
8. Ashori A. Wood-plastic composites based on polyethylene and wood flour // *BioResources*. 2020. V. 15, N 2. P. 4321–4335.
9. Ершов Ю.А., Майорова Т.Н., Саркисов В.И. Химия полимеров: учебник для вузов. М.: Химия, 2021. 480 с.
10. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // *Waste Management*. 2017. V. 69. P. 24–58.