

УДК 678.6

## Обзор перспективных направлений трансформации ПЭТ-упаковки: рециклинг, биоматериалы и цифровизация

Лихтер Михаил Ростиславович, преподаватель, Уфимский государственный нефтяной технический университет, mihalihter@mail.ru

В статье рассматриваются перспективные технологические направления трансформации полиэтилентерефталата как ключевого материала упаковочной индустрии в условиях перехода к циркулярной экономике. Представлен сравнительный обзор современных и разрабатываемых методов рециклинга, альтернативных биополимерных материалов и цифровых решений с выделением их ключевых характеристик, преимуществ и ограничений промышленного внедрения. Полиэтилентерефталат, являясь доминирующим материалом для производства упаковочной тары, формирует значительные объемы отходов, что обуславливает комплексный характер экологической проблемы и актуальность разработки эффективных технологий его переработки и замещения. Установлено, что механический рециклинг, несмотря на широкое распространение, сопровождается деградацией физико-механических свойств материала и высокими требованиями к чистоте сырья, что ограничивает области применения вторичного полиэтилентерефталата. По результатам исследования обоснован вывод о синергетическом потенциале совокупного применения рассмотренных направлений для формирования устойчивой модели развития ПЭТ-упаковки.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, рециклинг, деполимеризация, биополимеры, циркулярная экономика, цифровизация, сортировка отходов, умная упаковка.

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) является основным материалом для производства упаковки, прежде всего бутылок для напитков, что обусловлено сочетанием таких свойств, как легкость, прочность, прозрачность и химическая инертность [1]. Вместе с тем глобальное доминирование ПЭТ в упаковочной отрасли привело к формированию масштабной экологической проблемы, связанной с накоплением пластиковых отходов. Традиционная линейная модель экономики «произвел — использовал — выбросил» исчерпала свои возможности, что обусловило поиск новых решений в рамках концепции замкнутого хозяйственного оборота [2].

Практическая пригодность ПЭТ к переработке, декларируемая в теоретических исследованиях, на практике сталкивается с существенными технологическими и экономическими ограничениями. К числу ключевых проблем относятся сложность разделения потоков отходов, загрязнение материала посторонними полимерами, прежде всего поливинилхлоридом (ПВХ), остатками пищевых продуктов и клеевых составов, а также деградация полимерных цепей при многократной механической переработке. Указанные факторы приводят к снижению качества и потребительской ценности вторичного гранулята ПЭТ [3]. В результате дальнейшее использование ПЭТ в качестве основного упаковочного материала напрямую зависит от способности отрасли преодолеть данные ограничения.

Одновременно развиваются альтернативные направления, связанные с созданием биосинтетических и биоразлагаемых полимеров. Мировой рынок биопластиков демонстрирует устойчивый рост, однако их широкое внедрение сопровождается возникновением новых проблем, в частности риском загрязнения традиционных потоков переработки ПЭТ [4].

Еще одним значимым направлением является цифровизация жизненного цикла упаковки, ориентированная на повышение эффективности сбора отходов, точности сортировки и обеспечение прослеживаемости материальных потоков на всех стадиях обращения упаковочной продукции.

Наиболее распространенным промышленным способом переработки ПЭТ-отходов является механическая переработка. Технологический процесс включает последовательные стадии сортировки, измельчения, мойки, разделения фракций и грануляции. Качество получаемого вторичного ПЭТ в решающей степени определяется чистотой исходного сырья. Наибольшие технологические затруднения вызывает удаление поливинилхлорида, плотность которого близка к плотности ПЭТ. Присутствие даже незначительных

количеств ПВХ, порядка 50 ppm, в перерабатываемой фракции приводит к его термическому разложению в экструдере с выделением хлороводорода. Это, в свою очередь, вызывает разрушение цепей ПЭТ, изменение цвета и повышение хрупкости гранулята [3]. Основными источниками такого загрязнения являются ПВХ-этикетки, защитные кольца и элементы крышек.

Для повышения эффективности разделения материалов внедряются автоматизированные методы сортировки, основанные на оптическом и рентгенофлуоресцентном анализе, которые позволяют с высокой точностью выявлять и отделять ПВХ-фракцию от ПЭТ [5].

Несмотря на постоянное совершенствование технологий, механическая переработка обладает принципиальным ограничением, связанным с термомеханической деградацией полимера при повторных циклах переработки. В результате область применения вторичного ПЭТ в основном ограничивается производством волокон и формованных изделий, не предназначенных для контакта с пищевой продукцией.

Химическая переработка, или деполимеризация, рассматривается как стратегическое направление, обеспечивающее возможность формирования замкнутого цикла «бутылка — бутылка». В отличие от механического способа данный подход предполагает расщепление макромолекул ПЭТ до исходных мономеров — терефталевой кислоты и этиленгликоля — либо их производных с последующей очисткой и повторным синтезом материала, по своим свойствам эквивалентного первичному сырью.

К основным промышленным методам химической переработки ПЭТ относятся гликолиз, метанолиз и гидролиз. Гликолиз представляет собой процесс переработки ПЭТ, при котором полимер разрушается под действием гликоля, чаще этиленгликоля, при повышенных температурах от 180 до 250 °С. В результате образуется промежуточный продукт, который после очистки может быть использован для получения нового ПЭТ. Метанолиз основан на деполимеризации материала метанолом под давлением с получением диметилтерефталата и этиленгликоля. Гидролиз предполагает расщепление ПЭТ водой в кислой, щелочной либо нейтральной среде с образованием терефталевой кислоты и этиленгликоля. В последние годы активно разрабатываются ферментативные методы гидролиза, отличающиеся более мягкими условиями проведения процесса и высокой избирательностью [6].

Ключевым преимуществом химической переработки является

возможность утилизации сильно загрязненных, окрашенных отходов, а также текстильных материалов с получением продукта высокого качества. Основным ограничивающим фактором для широкого промышленного внедрения данных технологий остается их высокая капиталоемкость и энергоемкость, обусловленные необходимостью применения сложного оборудования и строгого контроля технологических параметров [6].

Развитие биополимеров рассматривается как ответ промышленности на общественный запрос на экологически безопасные и возобновляемые материалы. В сфере упаковки можно выделить два основных направления данного процесса.

Био-ПЭТ является химически идентичным традиционному полиэтилентерефталату, однако часть его сырьевой базы имеет возобновляемое происхождение. В настоящее время в промышленном обороте представлен ПЭТ, в котором до 30 % этиленгликоля производится из биоэтанола, получаемого, в частности, из сахарного тростника или кукурузы. Технологии получения терефталевой кислоты из биомассы находятся на стадии разработки. Био-ПЭТ полностью совместим с существующей инфраструктурой переработки и обладает теми же эксплуатационными характеристиками, что и материал нефтехимического происхождения. Вместе с тем его экологические преимущества и стоимость в значительной степени зависят от методологии оценки жизненного цикла и цен на сельскохозяйственное сырье [4].

Другую группу составляют биоразлагаемые полимеры, которые рассматриваются как решение для сегментов, в которых сбор и переработка упаковки являются экономически или технически нецелесообразными, например при производстве одноразовой посуды или упаковки для свежих продуктов. Наиболее распространенными представителями данной группы являются полилактид и полигидроксиалканоаты. Полилактид получают путем поликонденсации молочной кислоты, образующейся в процессе ферментации сахаров. Он характеризуется высокой прозрачностью и жесткостью, однако обладает низкими барьерными свойствами и сравнительно низкой температурой стеклования, а его утилизация осуществляется преимущественно путем промышленного компостирования. Полигидроксиалканоаты представляют собой полиэфиры, синтезируемые микроорганизмами, и отличаются более широкими условиями биоразложения, в т. ч. в морской среде, однако их промышленное производство остается значительно более затратным [4].

Внедрение биоразлагаемых полимеров формирует новый вызов, связанный с риском загрязнения потоков отходов ПЭТ, что может привести к ухудшению качества вторичного материала. В связи с этим возрастает необходимость параллельного развития инфраструктуры раздельного сбора и утилизации таких материалов, а также внедрения надежных систем их идентификации.

1. Цифровые технологии не выступают самостоятельным способом переработки отходов, однако выполняют ключевую роль связующего элемента, повышающего эффективность функционирования всей системы циркулярной экономики.

2. Так, инициатива *HolyGrail 2.0*, реализуемая консорциумом компаний в странах Европейского союза, предусматривает нанесение на упаковку невидимых для человека цифровых водяных знаков в форме кодов *DataMatrix*, содержащих сведения о составе материала. На сортировочных линиях высокоскоростные камеры считывают данные коды, что позволяет с высокой точностью, достигающей 95 %, разделять потоки отходов, в т. ч. идентифицировать многослойные и композитные материалы, не поддающиеся сортировке традиционными оптическими методами [7].

3. Системы депозитного возврата тары все чаще интегрируются с мобильными приложениями, предоставляющими потребителям возможность получения залога или бонусов за возвращенную упаковку, а операторам — отслеживать объемы сбора в режиме реального времени и оптимизировать логистические процессы. Цифровизация таких систем позволяет повысить уровень возврата ПЭТ-бутылок до 90 % и более, обеспечивая перерабатывающие предприятия стабильным потоком качественного вторичного сырья [7].

4. Распределенные реестры, основанные на технологии блокчейн, применяются для формирования цифровых паспортов продукции и отслеживания движения вторичного сырья по всей цепочке создания стоимости — от переработчика до производителя упаковки и конечного правообладателя товарного знака. Это способствует повышению прозрачности процессов, подтверждению содержания вторичного материала в продукции и формированию предпосылок для учета углеродного следа [8].

5. Проведенный обзор позволяет осуществить сравнительную оценку рассмотренных технологических направлений и сформулировать ряд обобщающих выводов. Ни одно из анализируемых направлений в отдельности не способно обеспечить устойчивость ПЭТ-упаковки в долгосрочной перспективе. Развитие отрасли возможно лишь в рамках гибридной модели, предполагающей сочетание глубокой переработки, рационального использования альтернативных материалов и сквозной цифровизации процессов.

6. Химическая переработка ПЭТ выступает стратегически значимым элементом формирования замкнутого цикла обращения упаковки и требует приоритетной поддержки со стороны государства и частного сектора, в т. ч. в форме инвестиций в научные исследования и опытно-промышленные проекты. Биополимеры, включая био-ПЭТ и биоразлагаемые материалы, целесообразно рассматривать как нишевые решения, применение которых должно сопровождаться четким функциональным позиционированием и созданием специализированных систем сбора и утилизации, исключающих их смешение с традиционными пластиковыми потоками.

7. Цифровизация, в свою очередь, является критически важным фактором повышения эффективности систем сбора и переработки отходов. Ее внедрение должно носить комплексный характер и сопровождаться разработкой единых технических и информационных стандартов.

8. Для Российской Федерации, обладающей значительными мощностями по производству первичного ПЭТ, приоритетной задачей становится ускоренное развитие инфраструктуры сбора, сортировки и, прежде всего, глубокой переработки отходов с акцентом на внедрение технологий химической переработки и сопутствующих цифровых решений.

Настоящий обзор показывает, что полиэтилентерефталат, столкнувшись с экологическими вызовами, не будет просто вытеснен альтернативными материалами, а подвергнется глубокой технологической трансформации. Устойчивое будущее данного упаковочного материала будет определяться способностью отрасли сформировать интегрированную систему, в рамках которой усовершенствованные технологии переработки, прежде всего химической, обеспечат замкнутость материального цикла, биополимеры займут четко определенные рыночные ниши, а цифровые технологии будут выполнять функцию координирующего механизма, обеспечивающего эффективность и прозрачность движения материальных потоков. Достижение указанной цели требует согласованных усилий органов публичной власти, бизнеса и научного сообщества.

### Примечания

1. Переработка ПВХ в ПЭТ-бутылках: понимание проблем и стратегии удаления. URL: <https://www.recyclemachine.net/ru/пвх-при-переработке-пэт-бутылок-поним/> (дата обращения: 10.12.2025).
2. Ближе к природе — цифровые технологии и упаковка. URL: <https://www.sig.biz/ru-ru/novosti-i-poleznaya-informafiya/blog/upakovka-zamknutyi-fiki-proizvodstva> (дата обращения: 13.12.2025).
3. The future of biodegradable and compostable packaging to 2029. URL: <https://www.smithers.com/services/market-reports/packaging/biodegradable-and-compostable-packaging-to-2029> (дата обращения: 13.12.2025).
4. Трудности, возникающие при переработке ПЭТ. URL: <https://www.kitechrecyclingmachine.com/ru/difficulties-faced-in-pet-recycling.html> (дата обращения: 13.12.2025).
5. Цифровизация и ИИ в упаковке: как технологии меняют процесс упаковки. URL: <https://my-pack.kz/novosti/tsyvrovyzatsiya-v-upakovke-kak-ykusstvennyi-yntellekt-meniaet-protsess-upakovky-ru/> (дата обращения: 16.12.2025).
6. How does PET plastic recycling work? URL: <https://www.recycletheone.com/recycling-pet-plastic/how-does-pet-plastic-recycling-work/> (дата обращения: 16.12.2025).
7. The future of biodegradable and compostable packaging materials. URL: <https://www.packaging-labelling.com/articles/the-future-of-biodegradable-and-compostable-packaging-materials> (дата обращения: 17.12.2025).
8. Переработка и вторичное использование ПЭТ-бутылок. URL: <https://zavodprotey.ru/articles/vtorichnoe-ispolzovanie-pet-butyllok/> (дата обращения: 18.12.2025).

### English version

Review of promising directions for the transformation of PET packaging: recycling, biomaterials, and digitalization

Likhter Mikhail Rostislavovich, lecturer, Ufa State Petroleum Technological University

This article examines promising technological directions for the transformation of polyethylene terephthalate (PET) as a key material of the packaging industry in the context of the transition to a circular economy. A comparative review of existing and emerging recycling methods, alternative biopolymer materials, and digital solutions is presented, with an emphasis on their key characteristics, advantages, and limitations related to industrial implementation. As the dominant material for the production of packaging containers, PET generates significant volumes of waste, which determines the complex nature of the environmental challenge and the relevance of developing effective technologies for its recycling and substitution. It is established that mechanical recycling, despite its widespread use, is accompanied by the degradation of physical and mechanical properties and stringent requirements for feedstock purity, which limits the application areas of recycled PET. Based on the research results, the article substantiates the conclusion regarding the synergistic potential of the combined application of the analyzed approaches for the formation of a sustainable development model for PET packaging.

Keywords: polyethylene terephthalate, recycling, depolymerization, biopolymers, circular economy, digitalization, waste sorting, smart packaging.