

УДК 658.567.1

*Л. А. Ишин*

Ассоциация проектировщиков «Столичное объединение проектировщиков»  
саморегулируемая организация, Москва, e-mail: av103mail@gmail.com

## ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

**Ключевые слова:** полимерные отходы, вторичная переработка, логистика сбора отходов, организационно-экономические барьеры, технологические ограничения.

В статье исследуются причины, по которым переработка полимерных отходов остаётся недостаточно развитой, несмотря на признанную экологическую и ресурсную значимость этой сферы. На основе анализа научных публикаций и отраслевых отчётов выделены основные препятствия: неоднородность и загрязнённость собираемого сырья, снижение эксплуатационных свойств при многократной переработке, ограниченные инвестиции в передовые сортировочные линии и химические методы переработки. Отдельное внимание уделено организационным и нормативным факторам: слабая система раздельного сбора, недостаточная вовлечённость потребителей, нестабильный спрос на продукцию и фрагментарное регулирование. Сравнение с практикой Европейского союза демонстрирует, что решающую роль играет совокупность финансовых стимулов и жёстких обязательств производителей, включая депозитные схемы и требования к содержанию. Автором предложены меры, направленные на расширение инфраструктуры сбора, модернизацию перерабатывающих мощностей, усиление экономических рычагов и развитие просветительских программ, что в перспективе должно вывести отрасль на устойчивую траекторию роста и приблизить Россию к экономике замкнутого цикла.

*L. A. Ishin*

Association of designers "Capital association of designers" self-regulating organization,  
Moscow, e-mail: av103mail@gmail.com

## ORGANIZATIONAL, ECONOMIC AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF POLYMER WASTE PROCESSING

**Keywords:** polymer waste, recycling, waste collection logistics, organizational and economic barriers, technological limitations.

The article examines the reasons why polymer waste recycling remains underdeveloped, despite the recognized environmental and resource significance of this area. Based on an analysis of scientific publications and industry reports, the main obstacles are identified: heterogeneity and contamination of collected raw materials, deterioration of operational properties during repeated recycling, and limited investment in advanced sorting lines and chemical recycling methods. Special attention is paid to organizational and regulatory factors: a weak separate collection system, insufficient consumer involvement, unstable demand for products, and fragmented regulation. A comparison with European Union practices shows that a combination of financial incentives and strict obligations on manufacturers, including deposit schemes and content requirements, plays a decisive role. The author proposes measures aimed at expanding the collection infrastructure, modernizing processing facilities, strengthening economic levers, and developing educational programs, which in the long term should put the industry on a sustainable growth trajectory and bring Russia closer to a circular economy.

### Введение

Полимерные материалы стали неотъемлемым элементом современной экономики. По оценкам «Организации экономического сотрудничества и развития» ежегодный мировой выпуск пластмасс превышает 400 млн тонн [1]. Несмотря на накопленный научно-технический потенциал, обращение с полимерными отходами остаётся одной из наиболее острых экологических проблем. По оценкам экспертов, в 2019 году 49,2% было отправлено на по-

лигоны, 19,1% сожжено, и лишь 9% переработано [2]. В 2022 г. доля переработанного пластика составляла порядка 8,9 % от совокупного глобального производства, при этом на долю Европы приходилось 21% мирового производства переработанного пластика (35,5 млн тонн) [3]. Исследования показывают, что без системных изменений к 2050 г. объем полимерных отходов возрастёт до 12 млрд тонн [4].

В долгосрочной перспективе рост производства полимеров сопряжен с существен-

ными эколого-климатическими рисками. Ожидается, что годовые выбросы парниковых газов, образующиеся в результате всей цепочки производства, использования и обращения с пластиком, возрастут на 37%, достигнув 3,35 млрд тонн CO<sub>2</sub>-экв. уже к 2050 году [5].

Переработка полимерных отходов рассматривается как ключевой инструмент смягчения этих негативных эффектов, однако её развитие сдерживается комплексом технологических и организационных барьеров. В 2023 г. объём переработки пластмасс в России достиг 7,1 млн тонн [6].

**Цель исследования.** Настоящая статья направлена на систематизацию ключевых организационно-экономических и технологических проблем, препятствующих масштабному внедрению вторичной переработки синтетических полимерных отходов, и на формирование целостного набора рекомендаций по их преодолению.

#### Методы и материалы исследования

В работе использовались открытые данные российских и зарубежных СМИ, научная литература по теме исследования, а также сводные отчёты Plastics Europe и OECD. Были проанализированы действующие российские и европейские законы и нормативы, касающиеся полимерных отходов. Комплексный анализ проблемы позволил уточнить технологические и организационно-экономические

барьеры и предложить практические меры их устранения.

#### Результаты исследования и их обсуждение

##### Классификация полимерных отходов

По способности к вторичной переработке синтетические полимерные отходы условно делятся на термопластичные, термореактивные и эластомерные.

**Термопласты.** Линейные или разветвлённые макроцепи; многократно переходят в плав при 110-270 °С, что позволяет их механически перерабатывать без изменения химической структуры [7]. Термопласты формируют около 80-85% мирового выпуска пластмасс [8].

**Термореактопласты.** Сформированные при отверждении трёхмерные сетки, которые при нагреве уже не плавятся, а разрушаются. Поэтому повторная плавка невозможна и механический способ неприменим. Перспективные подходы – гликолиз, каталитическая деполимеризация или пиролиз, позволяющие вернуть мономеры либо получить нефтехимическое сырьё [9–11].

**Эластомеры.** Вулканизованные каучуки с редкими связями, обеспечивающими высокую упругую деформацию, но полностью исключающие повторное плавление. Основной практический способ утилизации – дробление в резиновую крошку для асфальтовых смесей, покрытий и др., либо переработка изношенных шин в топливо [12,13].

Сравнительная характеристика методов переработки

| Метод                     | Преимущества                                                                                                                                 | Недостатки                                                                                                                                                                                          | Доля применения                                                                                                                                                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Механический              | Сохраняет материал в хозяйственном обороте («замкнутый цикл»), экономит сырьё и энергию. Относительно низкие затраты, отлаженные технологии. | Требует сбора и сортировки по типам полимеров. Качество переработанного полимера ниже первичного. Не пригоден для сильно загрязнённых или смешанных отходов. Ограниченное число циклов переработки. | 95-99% от всей переработки пластмасс приходится на механический метод.                                                                                                             |
| Химический                | Позволяет переработать отходы, непригодные для механического метода.                                                                         | Высокая энергоёмкость и стоимость процессов. Требует сложных реакторов. Пока методы находятся в стадии развития.                                                                                    | <1% переработки – доля химического метода. Однако ожидается рост к 2030 г. при вводе новых мощностей.                                                                              |
| Энергетическая утилизация | Полностью уничтожает отходы, резко сокращая их объём. Позволяет утилизировать любые виды пластика без сортировки.                            | Не возвращает материал в экономику (линейная утилизация). Зола от сжигания токсична и требует захоронения на специальных полигонах. Возможны выбросы парниковых газов и токсичных соединений.       | В Европе доля сжигания высока: до 42% пластиковых отходов в 2020 г. В России пока сжигается малая часть ТКО, но планируется увеличить за счёт ввода новых мусоросжигающих заводов. |

Источники: составлено авторами на основе [14–18].

Совокупность технологий переработки полимерных отходов делят на механические, химические и энергетические методы.

Для оценки возможности использовать разные подходы к переработке полимерных отходов необходимо сопоставить их преимущества, недостатки и степень применения на практике (таблица).

В дополнение к перечисленным, развиваются биотехнологические методы разложения пластика (ферментативные), однако пока они не вышли за рамки лабораторных исследований и пилотных установок. Также набирают популярность биоразлагаемые полимеры, способные минерализоваться в компосте, но их распространение пока невелико [19].

#### ***Логистика и организация сбора отходов***

Успешность переработки полимерных отходов определяется не только технологиями, но и организацией сбора, сортировки и ответственности производителей.

В странах Европейского союза (ЕС) эта цепочка опирается на расширенную ответственность производителя, унифицированную маркировку упаковки и депозитно-залоговые системы. В результате уже к 2022 г. на повторную переработку направлялось 41 % пластиковой упаковки против 38 % десятью годами ранее [20]. Параллельно ведутся исследования по оптимизации логистических сетей, где модели смешанного целочисленного программирования демонстрируют, что укрупнение узлов сбора и переход к мультимодальным перевозкам способны снизить удельные издержки и увеличить объём переработки отходов [21,22].

В Российской Федерации логистическая компонента остаётся узким местом. Из совокупного объёма пластмасс на рынке, лишь 900 тыс. тонн (12 % от общего количества пластиковых отходов страны) приходилось на вторичные полимеры, что является средним мировым показателем, но значительно ниже показателей ЕС [6]. Отсутствие единой национальной системы, единых стандартов маркировки и недостаточная эффективность сортировочных линий предопределяют высокие расходы на транспорт и селекцию вторсырья, что делает переработку невыгодной даже при растущем спросе.

#### ***Технологические ограничения переработки полимеров***

*Неоднородность сырья.* Разные виды пластика несовместимы при совместном

плавлении, поэтому требуется тщательная сортировка по типам полимеров [23,24]. В России эффективность мусоросортировочных комплексов пока не позволяет полностью загружать перерабатывающие предприятия всеми видами полимерного вторсырья, и переработчики вынуждены покупать отходы пластика за рубежом. Импорт пластиковых отходов в 2018 году составил 20 млн долл. США [25].

*Дегградация полимеров при механической переработке.* Повторная переработка пластмасс сопровождается постепенным ухудшением их свойств. При каждом цикле термического переплава происходит сокращение полимерных цепей и накопление дефектов структуры, что приводит к падению прочности, ударной вязкости и других механических характеристик [26]. Например, для полиолефинов отмечено, что при повторной экструзии уже через 2–3 цикла заметно снижается молекулярная масса и прочность материала [27].

*Недостаток инвестиций в современные технологии.* Для преодоления указанных технологических проблем требуются значительные вложения в инфраструктуру и НИОКР, которые пока остаются ограниченными. Отсутствие достаточного финансирования приводит к тому, что переработка в основном ведётся старыми методами, с невысокой эффективностью. Низкая рентабельность переработки отпугивает инвесторов, а нехватка инвестиций не позволяет поднять эффективность отрасли.

#### ***Организационно-экономические барьеры переработки полимеров***

*Экономическая нецелесообразность.* Производство пластика из первичного сырья (нефти) остаётся зачастую более дешёвым вариантом, чем переработка. Так, исследования показывают, что технологические методы химической переработки пластика (включая термохимические процессы) в отсутствие субсидий генерируют низкорентабельный результат [28]. Интенсификация переработки полимерных отходов требует значительных инвестиций в оборудование и логистику, а готовая вторичная продукция часто не конкурентоспособна по цене и качеству из-за дополнительных затрат на очистку и сортировку.

*Нестабильный спрос на вторсырьё и сбыт продукции.* Рынок вторичных полимеров характеризуется высокой волатильно-

стью. Цены на вторичное сырьё подвержены резким колебаниям, и переработчики часто не уверены, найдётся ли покупатель [29]. В результате, упаковку из вторсырья применяют в основном лидеры отраслей из имиджевых соображений, тогда как массовый рынок остаётся привержен первичному пластику [30]. Низкий платёжеспособный спрос на переработанный пластик снижает потенциал экономики переработки и делает отрасль рискованной для инвесторов.

*Отсутствие инфраструктуры сбора и сортировки.* Организационной предпосылкой успешной переработки является налаженный сбор отходов у населения и бизнеса. В странах ЕС действуют системы раздельного сбора, депозитные системы для бутылок, контейнерные площадки для разных фракций отходов и пр. Это обеспечивает устойчивый поток относительно чистого и однородного вторсырья на переработку. В России же инфраструктура сбора всё ещё формируется. По данным Минприроды РФ, в стране действует около 80 перерабатывающих заводов полимерных отходов [25], но сырья им не хватает – из 3,6-5 млн тонн образующихся ежегодно отходов на переработку попадает лишь 7-20% [31]. Остальное по большей части захоранивается, поскольку наблюдается недостаток пунктов приёма, раздельных контейнеров и эффективной логистики сбора [32].

*Низкая осведомлённость потребителей.* Недостаточная информированность и вовлечённость населения остаётся одним из ключевых нефинансовых барьеров, ограничивающих поток чистого сырья в цепочку переработки. Социологические исследования показывают, что, когда население знает правила сортировки и доверяет качеству переработанных изделий, уровень участия в раздельном сборе растёт. В то же время отечественные опросы выявляют, что лишь 20% россиян регулярно сортируют пластик [33,34]. Для решения проблемы необходима интенсификация формирования программ экологического просвещения в школах и ВУЗах. Кроме того, целесообразно использовать и экономические стимулы для населения, например, депозитная система тары, где в цену товара закладывается депозит, который возвращается покупателю при возврате пустой тары, скидки или вознаграждения за сдачу на переработку и др. Без изменения потребительского поведения организационные

усилия по развитию переработки будут существенно затруднены.

*Недостаточная нормативно-правовая база.* Эффективная переработка синтетических полимеров в мировой практике опирается на жёсткое регулирование, которое создаёт ценовые и правовые стимулы к использованию переработанных материалов. В Европейском союзе действует следующий комплекс мер:

- Платёж 0,8 евро за кг за непереработанные пластиковые упаковочные отходы, взимаемый с государств-членов в структуре бюджета ЕС с 2021 г. [35];

- Национальные налоги на пластик. Например, Испания с 2023 г. взимает 450 евро за тонну за непереработанную пластмассовую тару [36];

- Директива ЕС об ограничении использования пластиковых изделий 2019/904 требует, чтобы пластиковые бутылки из ПЭТ (изделие из полиэтилентерефталата) содержали не менее 25% переработанного пластика, а к 2030 году это содержание должно достичь не менее 30% [37];

- В Германии Закона об упаковке (VerpackG) вводит сборы за переработку упаковок, где сборы будут ниже, если упаковку легко переработать, и выше, если упаковка изготовлена из неперерабатываемых материалов и, соответственно, ее будет трудно переработать [38].

Эти и другие регуляторные меры делают использование вторичных полимеров как экономически, так и юридически выгодным, тем самым стимулируя инвестиции в сортировку, обработку и химическую переработку.

В России сопоставимые механизмы только формируются. Реформа расширенной ответственности производителей (РОП) стартовала лишь в 2024 г. с принятием Федерального закона от 04.08.2023 № 451-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» и только к 2027 г. предусматривает 100% норматив утилизации упаковки [39].

Отсутствуют и обязательные нормы по минимальной доле вторичного пластика в продукции, а обсуждения налога на первичный пластик и возможных поощрений за использование вторсырья пока не перешли к практической реализации, поэтому большинству производителей легче заплатить небольшой экологический сбор, чем

инвестировать в системы сбора и сортировки отходов или уменьшать долю первичного полимера в своих товарах.

Анализ показал, что развитие переработки пластика в России ограничивают три взаимосвязанных блока факторов: техническое качество сырья, организационная слабость системы сбора и экономическая непривлекательность вторичного материала. Для перехода к устойчивой модели необходим пакет согласованных ряда мер. Государству целесообразно ввести минимальные квоты на содержание вторичного пластика в упаковке и затем поэтапно их повышать. На это прямо указывает результат модели на основе машинного обучения в рамках симуляции Монте-Карло в исследовании [40], где при требовании, чтобы не менее 40 % пластика во всех восьми секторах потребления приходилось на вторичное полимерное сырьё, объём пластиковых отходов к 2050 г. сокращается с 121 до 59 млн тонн, а валовые выбросы парниковых газов снижаются с 3,35 до 2,79 Гт CO<sub>2</sub>-экв. При этом следует дифференцировать экологический сбор – чем сложнее переработать упаковку, тем выше платёж, – и одновременно предоставить переработчикам налоговые льготы и субсидии для обновления оборудования. Исследования показывают, что без поддержки НИОКР доля захоронения/сжигания возрастает, тогда как в инвестиции в технологии напрямую наращивают мощность и удешевляют обработку [41].

Требуется также закрепить единые санитарные и технические стандарты, ввести депозитно-залоговый механизм, бонусы за сдачу упаковки и образовательные программы для населения, а также ускорить развёртывание повсеместного раздельного накопления отходов с развитием сети приёмных автоматов для тары в торговых сетях и стандартизировать упаковку и ее компоненты. Целесообразность данных мер демонстрируют выводы международной некоммерческой организации Ellen MacArthur Foundation (EMF). По их расчетам, при сценарии «System Change», с масштабным переходом к повторному использованию в рамках общей инфраструктуры, с вовлечением 40% участников рынка, 95 % возврата потребительских упаковок, позволяющий использовать упаковку около 15 раз и универсальной упаковке, которая может быть использована для любого типа наполнителя, при инвестициях в 6,7 млрд евро,

чистые затраты на многоразовые бутылки сократятся на 21-23%, общие затраты могут стать на 28% ниже, чем для одноразовых, капитальные затраты и операционные расходы сократятся на 65%, а переход от одноразовых ПЭТ-бутылок к многоразовому стеклу может сократить выбросы парниковых газов на 34% и потребление воды на 66% [42].

Для государственных органов управления крайне важно создать стабильную и предсказуемую институциональную среду, в области охраны окружающей среды и управления отходами. Например, в Германии, сумели сохранить высокие показатели доходности и создать благоприятные условия для инвестиций и инноваций. В Германии внедрили свою систему возврата депозитов в 2003 году, инвестировав около 100 миллионов евро в создание инфраструктуры. Ежегодные эксплуатационные расходы при этом составляют около 60 миллионов евро. Однако система приносит около 210 миллионов евро годового дохода от продажи вторичных материалов, что приводит к чистой экономии в размере 150 миллионов евро в год и окупается в течение 3-5 лет благодаря высокому уровню участия населения и эффективной работе системы [43].

Лишь синхронное выполнение указанных мер – улучшение логистики, модернизация технологий, мотивация населения и понятные правила для производителей – позволит сформировать экономически жизнеспособную и экологически эффективную цепочку обращения пластика, приближая страну к полноценной циркулярной модели.

### Выводы

В совокупности проведённый в статье анализ подтверждает, что ключевые ограничения российской системы обращения с полимерными отходами носят взаимосвязанный характер и затрагивают качество собираемого сырья, институциональную слабость инфраструктуры и низкую экономическую мотивацию участников рынка. Без одновременного решения технологических, организационных и нормативных вопросов переработка пластика остаётся нерентабельной, а зависимость от первичных полимеров – устойчивой.

Предлагаемый авторами пакет мер формирует взаимодополняющую цепочку сти-

мулов: жёсткие минимальные квоты на долю вторичного пластика и экомодулированный сбор создают рыночный спрос, налоговые льготы и субсидии делают модернизацию мощностей финансово оправданной, единые санитарно-технические стандарты и депозитные механизмы обеспечивают прозрачность правил, тогда как раздельный сбор с сетью приёмных автоматов гарантирует стабильный поток однородного сырья. Опыт зарубежных систем, приведённых в статье, демонстрирует, что именно сочетание нормативной предсказуемости, экономических

стимулов и просвещения населения позволяет быстро повысить долю переработки, снизить экологические риски и открыть новые ниши для инвестиций.

Таким образом, только синхронная реализация перечисленных мер – от стандартизации упаковки и логистики до образовательных программ – способна перевести отрасль из фрагментарного состояния в полноценную циркулярную модель, обеспечивающую как экологическую устойчивость, так и экономическую эффективность на долгосрочном горизонте.

#### *Библиографический список*

1. Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060 // OECD Publishing. 2022. [Электронный ресурс]. DOI: 10.1787/aa1edf33-en.
2. Gazeau B., Zaman A., Minunno R., Shaikh F. Developing Traceability Systems for Effective Circular Economy of Plastic: A Systematic Review and Meta-Analysis // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 22. P. 9973. DOI: 10.3390/su16229973.
3. Plastics Europe launches Plastics – the fast Facts 2023 // Plastics Europe. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://plasticseurope.org/media/plastics-europe-launches-the-plastics-the-fast-facts-2023/> (дата обращения: 15.06.2025).
4. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. 2017. Vol. 3. No. 7. P. e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
5. Pottinger A.S., Geyer R., Biyani N., Martinez C.C., Nathan N., Morse M.R., Liu C., Hu S., de Bruyn M., Boettiger C., Baker E., McCauley D.J. Pathways to reduce global plastic waste mismanagement and greenhouse gas emissions by 2050. Science. 2024. Vol. 386. No. 6726. P. 1168–1173. DOI: 10.1126/science.adr3837.
6. Пост-релиз VI Форума Союза переработчиков пластмасс // Союз переработчиков пластмасс. 2022. [Электронный ресурс]. URL: [https://polyprofi.ru/post\\_reliz\\_VI\\_foruma\\_spp.pdf](https://polyprofi.ru/post_reliz_VI_foruma_spp.pdf) (дата обращения: 15.06.2025).
7. Khairul Anuar S.Z., Nordin A.H., Nur Husna S.M., Yusoff A.H., Paiman S.H., Md Noor S.F., Nordin M.L., Ali S.N., Nazir Syah Ismail Y.M. Recent advances in recycling and upcycling of hazardous plastic waste: A review. Journal of environmental management. 2025. Vol. 380. P. 124867. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124867.
8. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis // Communications Earth Environment. 2025. Vol. 6. P. 257. DOI: 10.1038/s43247-025-02169-5.
9. Korley L.T.J., Epps T.H., 3rd, Helms B.A., Ryan A.J. Toward polymer upcycling – adding value and tackling circularity // Science. 2021. Vol. 373. No. 6550. P. 66–69. DOI: 10.1126/science.abg4503.
10. Khopade K.V., Chikkali S.H., Barsu N. Metal-catalyzed plastic depolymerization // Cell Reports Physical Science. 2023. Vol. 4. No. 5. P. 101341. DOI: 10.1016/j.xcrp.2023.101341.
11. Clark R.A., Shaver M.P. Depolymerization within a Circular Plastics System // Chemical Reviews. 2024. Vol. 124. No. 5. P. 2617–2650. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00739.
12. Moreno T., Balasch A., Bartolí R., Eljarrat E. A new look at rubber recycling and recreational surfaces: The inorganic and OPE chemistry of vulcanised elastomers used in playgrounds and sports facilities // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 868. P. 161648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161648.
13. Goli V.S.N.S., Singh D.N. Polymer blends manufactured from fresh & landfill mined plastic waste: Are they composites? // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 426. No. 1. P. 139096. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139096.
14. Kalali E.N., Lotfian S., Shabestari M.E., Khayatzaheh S. A critical review of the current progress of plastic waste recycling technology in structural materials // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2023. Vol. 40. P. 100763. DOI: 10.1016/j.cogsc.2023.100763.
15. Cafiero L.M., De Angelis D., Tuccinardi L., Tuffi R. Current State of Chemical Recycling of Plastic Waste: A Focus on the Italian Experience // Sustainability. 2025. Vol. 17. No. 3. P. 1293. DOI: 10.3390/su17031293.

16. 90% на свалку: какие проблемы у переработки пластика в России // Национальная ассоциация нефтегазового сервиса. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://nangs.org/news/ecology/90-na-svalku-kakie-problemy-u-pererabotki-plastika-v-rossii> (дата обращения: 15.06.2025).
17. Geyer R. Production, use, and fate of synthetic polymers // *Plastic Waste and Recycling*. 2020. P. 13–32. DOI: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5.
18. Chemical Recycling in Brief // *Plastics Europe*. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/chemical-recycling-in-brief/> (дата обращения: 15.06.2025).
19. Котова И.Б., Тактарова Ю.В., Цавкелова Е.А. и др. Микробная деградация пластика и пути ее интенсификации // *Микробиология*. 2021. Т. 90, № 6. С. 627–659. DOI: 10.31857/S0026365621060082. EDN: KOXXDG.
20. 41% of plastic packaging waste recycled in 2022 // *Eurostat*. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241024-3> (дата обращения: 15.06.2025).
21. Wang S., Maravelias C.T. Optimization methods for plastics management supply chain design // *Aiche Journal*. 2024. Vol. 70. No. 8. P. e18464. DOI: 10.1002/aic.18464.
22. Wiman H., Siltaloppi J., Leinonen A. Finding high-impact intervention points for plastic recycling using an exploratory stock-flow model // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 395. No. 44. P. 136396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136396.
23. Titone V., Gulino E.F., La Mantia F.P. Recycling of Heterogeneous Mixed Waste Polymers through Reactive Mixing // *Polymers (Basel)*. 2023. Vol. 15. No. 6. P. 1367. DOI: 10.3390/polym15061367.
24. Singh N., Walker T.R. Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem // *Npj Materials Sustainability*. 2024. Vol. 2. No. 1. P. 17. DOI: 10.1038/s44296-024-00024-w.
25. Как устроена сфера переработки пластика в России // АО «Росбизнесконсалтинг». 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/61824ae79a79472af5cd7189> (дата обращения: 15.06.2025).
26. Douiri L., Jdidi H., Kordoghli S., El Hajj Sleiman G. Degradation indicators in multiple recycling processing loops of impact polypropylene and high density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*. 2024. Vol. 219. No. 10. P. 110617. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110617.
27. Titone V., Botta L., La Mantia F.P. Mechanical Recycling of New and Challenging Polymer Systems: A Brief Overview. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2025. Vol. 310. No. 1. P. 2400275. DOI: 10.1002/mame.202400275.
28. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities // *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. 2009. Vol. 364. No. 1526. P. 2115–2126. DOI: 10.1098/rstb.2008.0311.
29. Доходные отходы: почему переработка вторсырья в России низкорентабельна // АО «Росбизнесконсалтинг». 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://nsk.rbc.ru/nsk/05/01/2018/59df3cae9a7947a309807d73> (дата обращения: 20.06.2025).
30. Почему переработка должна быть выгодна не только обществу, но и бизнесу // *Экология производства*. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://news.ecoindustry.ru/2023/12/pochemu-pererabotka-dolzhna-byt-vygodna-ne-tolko-obshhestvu-no-i-biznesu/> (дата обращения: 20.06.2025).
31. Сперанская О., Понизова О., Цитцер О., Гурский Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации // Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей (International Pollutants Elimination Network). 2021. [Электронный ресурс]. URL: [https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-russia-2021-epa\\_v1\\_4q-ru.pdf](https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-russia-2021-epa_v1_4q-ru.pdf) (дата обращения: 20.06.2025).
32. Abramova N. Analysis of waste management system reform in Russia // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258. No. 4. P. 08014. DOI: 10.1051/e3sconf/202125808014.
33. Shah P., Yang J.Z. When virtue is its own reward: How norms influence consumers' willingness to recycle and reuse. *Environmental Development*. 2023. Vol. 48. No. 02. P. 100928. DOI: 10.1016/j.envdev.2023.100928.
34. Kazan plans to become Russia's ecological capital // *Realnoe Vremya*. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://realnoevremya.com/articles/8887-kazan-plans-to-become-russias-ecological-capital> (дата обращения: 20.06.2025).
35. Plastics own resource // *European Commission*. 2025. [Электронный ресурс]. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027/revenue/own-resources/plastics-own-resource_en) (дата обращения: 20.06.2025).
36. On 1st January 2023, a new special tax on non-reusable plastic packaging also known as the Spanish “Plastic Packaging Tax” came into effect in Spain // *Law Print Pack*. 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://lawprintpack.co.uk/plastic-packaging-tax/plastic-packaging-tax-in-spain/> (дата обращения: 20.06.2025).

37. Single-use plastics // European Commission. 2025. [Электронный ресурс]. URL: [https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en) (дата обращения: 20.06.2025).
38. Single-use plastics ban and changes to EU packaging recycling fees // Sphera EC4P. 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://sphera.ec4p.com/resources/news/sweden-modulated-plastics-packaging-recycling-fees> (дата обращения: 20.06.2025).
39. Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 04.08.2023 N 451-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_453992/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_453992/). (дата обращения: 20.06.2025).
40. Pottinger A.S., Geyer R., Biyani N., Martinez C.C., Nathan N., Morse M.R., Liu C., Hu S., de Bruyn M., Boettiger C., Baker E., McCauley D.J. Pathways to reduce global plastic waste mismanagement and greenhouse gas emissions by 2050. *Science*. 2024. Vol. 386. No. 6726. P. 1168-1173. DOI: 10.1126/science.adr3837.
41. Sun D., Xie D., Jiang P., Xie J., Xu Y., Ren Y. Simulating the Effect of Mixed Subsidy Policies on Urban Low-Value Recyclable Waste in China: A System Dynamics Approach // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. No. 20. P. 10636. DOI: 10.3390/ijerph182010636.
42. Unlocking a reuse revolution: scaling returnable packaging // Ellen MacArthur Foundation. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/791a4013fead211e/original/Unlocking-a-reuse-revolution-Scaling-Returnable-Packaging.pdf> (дата обращения: 24.07.2025).
43. Lakhan C. Evaluating the effectiveness, costs, and challenges of deposit return systems for beverage containers: A meta-analysis // *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 2024. Vol. 13. No. 01. P. 112–131. DOI: 10.30574/wjaets.2024.13.1.0397.