

<https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i2.s149>

УДК 621.798

Перспективы повторной переработки отходов одноразовой упаковки

И. А. Кирш, С. А. Овсянников, О. В. Безнаева, О. А. Банникова,
М. И. Губанова, М. Н. Новиков, И. С. Тверитникова

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный
университет пищевых производств»,
Москва, Россия

Корреспонденция:

Губанова Марина Ивановна,
ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет
пищевых производств»,
адрес: 125080, г. Москва,
Волоколамское шоссе, 11.
e-mail: gubanovami@mgupp.ru

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов

Поступила: 25.05.2022

Принята: 28.06.2022

Опубликована: 30.06.2022

Copyright: © 2022 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема использования отходов одноразовой упаковки, утратившей свои первоначальные свойства, и ещё не устаревшей является весьма острой и актуальной, она имеет экономические и экологические аспекты.

Цель данной статьи оценить перспективы вторичной переработки различных видов одноразовой упаковки.

Материалы и методы. Проведен аналитический обзор современного состояния различных аспектов вторичной переработки отходов одноразовой упаковки. Определение физико-механических свойств композиций проводили в соответствии с ГОСТ 14236–81 «Пленки полимерные. Методы испытания на растяжение». Для определения молекулярной массы полимеров использовали вискозиметрический метод. Эксперименты проводили для ПЭ и ПП в о-ксилоле при температуре $85 \pm 3^\circ\text{C}$, ПА в м-крезоле при температуре $25 \pm 3^\circ\text{C}$. Для ПЭТФ определение молекулярной массы проводили в системе хлороформ и ацетон при температуре $25 \pm 3^\circ\text{C}$.

Результаты. Показано, что потенциал переработки вторичных материальных ресурсов зависит не только от технологий, которым посвящена статья, но и от качества входящего сырья, его однородности, степени загрязненности различными материалами и органическими соединениями.

Выводы. Полученные результаты дают возможность значительно увеличить объемы переработки отходов одноразовой упаковки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вторичное полимерное сырье, повторная переработка, механический способ переработки, химические методы переработки, одноразовая упаковка, отходы



Для цитирования: Кирш, И. А., Овсянников, С. А., Безнаева, О. В., Банникова, О. А., Губанова, М. И., Новиков, М. Н., Тверитникова, И. С. (2022). Перспективы повторной переработки отходов одноразовой упаковки. *Health, Food & Biotechnology*, 4(2), 31–47. <https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i2.s149>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i2.s149>

Prospects for the Recycling of Disposable Packaging Waste

Irina A. Kirsh, Sergey A. Ovsyannikov, Olga V. Beznaeva,
Olga A. Bannikova, Marina I. Gubanova, Maksim N. Novikov,
Izabella S. Tveritnikova

Moscow State University of Food
Production, Moscow, Russia

Correspondence:
Marina I. Gubanova,

Moscow State University of Food
Production,
11 Volokolamskoe highway, Moscow,
125080, Russia.

e-mail: gubanovami@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 25.05.2022

Accepted: 28.06.2022

Published: 30.06.2022

Copyright: © 2022 The Authors

ABSTRACT

Introduction. The problem of using disposable packaging waste that has lost its original properties and is not yet obsolete is very acute and urgent, it has economic and environmental aspects.

Purpose. The purpose of the work is to assess the prospects for recycling various types of disposable packaging.

Materials and Methods. An analytical review of the current state of various aspects of recycling of disposable packaging waste has been carried out. The determination of the physico-mechanical properties of the compositions was carried out in accordance with GOST 14236-81 "Polymer films. Methods of tensile testing". To determine the molecular weight of polymers, a viscosimetric method was used. Experiments were carried out for PE and PP in o-xylene at a temperature of $85 \pm 3^\circ\text{C}$, PA in m-cresol at a temperature of $25 \pm 3^\circ\text{C}$. For PET, the molecular weight was determined in the chloroform and acetone system at a temperature of $25 \pm 3^\circ\text{C}$.

Results. It is shown that the recycling potential of secondary material resources depends not only on the technologies to which the article is devoted, but also on the quality of incoming raw materials, its uniformity, the degree of contamination with various materials and organic compounds.

Conclusions. The results obtained make it possible to significantly increase the volume of recycling of disposable packaging waste.

KEYWORDS

secondary polymer raw materials, recycling, mechanical processing method, chemical processing methods, disposable packaging, waste



To cite: Kirsch, I. A., Ovsyannikov, S. A., Beznaeva, O. V., Bannikova, O. A., Gubanova, M. I., Novikov, M. N., Tveritnikova, I. S. (2022). Prospects for the recycling of disposable packaging waste. *Health, Food & Biotechnology*, 4(2), 31–47. <https://doi.org/10.36107/hfb.2022.i2.s149>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Национальному стандарту Российской Федерации¹, вводится довольно широкое понятие «перерабатываемость» полимерных отходов, включая упаковочные полимерные материалы: п. 3.11 — утилизация полимерных отходов (с получением вторичных материальных ресурсов), включающая операции по обработке полимерных отходов, включая их механическую переработку, переработку в исходный продукт (химическую переработку) и органическую переработку, исключая энергетическую ликвидацию с получением вторичных энергетических ресурсов². Все виды утилизации одноразовых упаковок можно классифицировать на три вида: механическая переработка; химическая, биологическая или органическая переработка. Указанные технологии переработки имеют свои особенности, «плюсы» и «минусы», поэтому выбор конкретной технологии зависит от ее технологического внедрения, эффективности, энергоёмкости производства и, самое главное — входящего сырья.

Вторичные материальные ресурсы

С сожалением можно отметить, что регламентирующих документов (стандартов) по заготовке отходов одноразовой полимерной упаковки не существует — лишь индивидуальные требования заготовительных центров, операторов по обращению с отходами и отдельных переработчиков, которые формируют спрос на вторичные материальные ресурсы^{3,4,5}.

На примере приёмных закупочных пунктов Производственно-заготовительного предприятия вторичного сырья «ПРЕСНЯ», рассмотрим требования к качеству вторичных материальных ресурсов.

При приёмке вторичных материальных ресурсов, заготовитель осуществляет первоначальный визуальный контроль: отходы должны быть однородными, сухими, чистыми, без посторонних включений.

В отношении отходов упаковки из бумаги и картона, операторы принимают, в основном, предварительно отсортированную коммерческую транспортную упаков-

ку — гофрокартон марки МС-5Б, который не загрязнен и собран непосредственно в торговых сетях и у производителей продукции. Аналогичные требования к сырью из целлюлозы, предъявляются и предприятиями по переработке бумаги и картона, например, «Промо-Карта»⁶, ООО «Челны Пак» и др.

Большие ограничения приводятся по стеклу и стеклотаре, включая при этом тугоплавкое стекло, хрусталь, цветное стекло, стекло с термоусадочной этикеткой и т.п. не принимается на переработку⁷.

В отношении пластиковых отходов, хорошо принимается операторами выдувная упаковка (канистры, флаконы) объёмом до 30 литров с отметкой ПНД, ПВД, ПП и цифровым обозначением 02, 04, 05, а также пленки и лотки, контейнеры из ПЭ и ПП.

Заготовительные центры «Раздельный сбор»⁸, «Сфера экологии»⁹, «Собиратор»¹⁰ принимают на переработку ПС и АБС-пластики, включая ударопрочный ПС в виде стаканчиков, флаконов, лотков, контейнеров, элементов транспортирования (ложементов), но при качественной сортировке по типам и видам, а также по степени загрязнения.

Стоит обратить внимание, что при приеме ПЭТФ бутылок, ограничений практически — нет. Оператор не принимает только ПЭТФ бутылки с металлическими пробками и кольцами, с этикетками из ПВХ.

Анализируя требования переработчиков к входящему сырью, таких как — ГК «Экотехнологии», «Интерпласт», АСТАТ, «Агросервис» и т.д., можно сделать вывод, что не существует ограничений по приему ПЭТФ бутылок по цветовой гамме.

Спрос на использованную ПЭТФ бутылку постоянно растет: цена за 1 кг бутылки, по состоянию на 4 квартал 2021 г., составляет от 54 до 68 руб. с НДС, в зависимости от уровня загрязненности и региона образования отхода^{11,12} (Волкова, 2020; Рзаев, 2018).

Рост цен на вторичное сырье связано не только с ростом цен на первичное сырье, но и увеличивающимся спросом на вторичное сырье, интерес к которому также постоянно растет, что подтверждается представленны-

¹ ГОСТ Р 54533–2011 (ISO15270:2008) от 01.01.2013 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководящие принципы и методы утилизации полимерных отходов»

² ГОСТ Р 54533–2011 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Дата введения 2013–01–01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097330> (дата обращения 12.12.2021)

³ <https://ubirator.com/punkty-priema-vtorsyrya>

⁴ <https://vtorplenplast.ru/>

⁵ <https://tbo.mosreg.ru/ekologicheskij-standart>

⁶ <https://promo-kart.ru/>

⁷ ГОСТ 34035–2016. «Тара Стекланная. Бой для стекловарения»

⁸ <https://rsbor.ru/>

⁹ <http://se.su/>

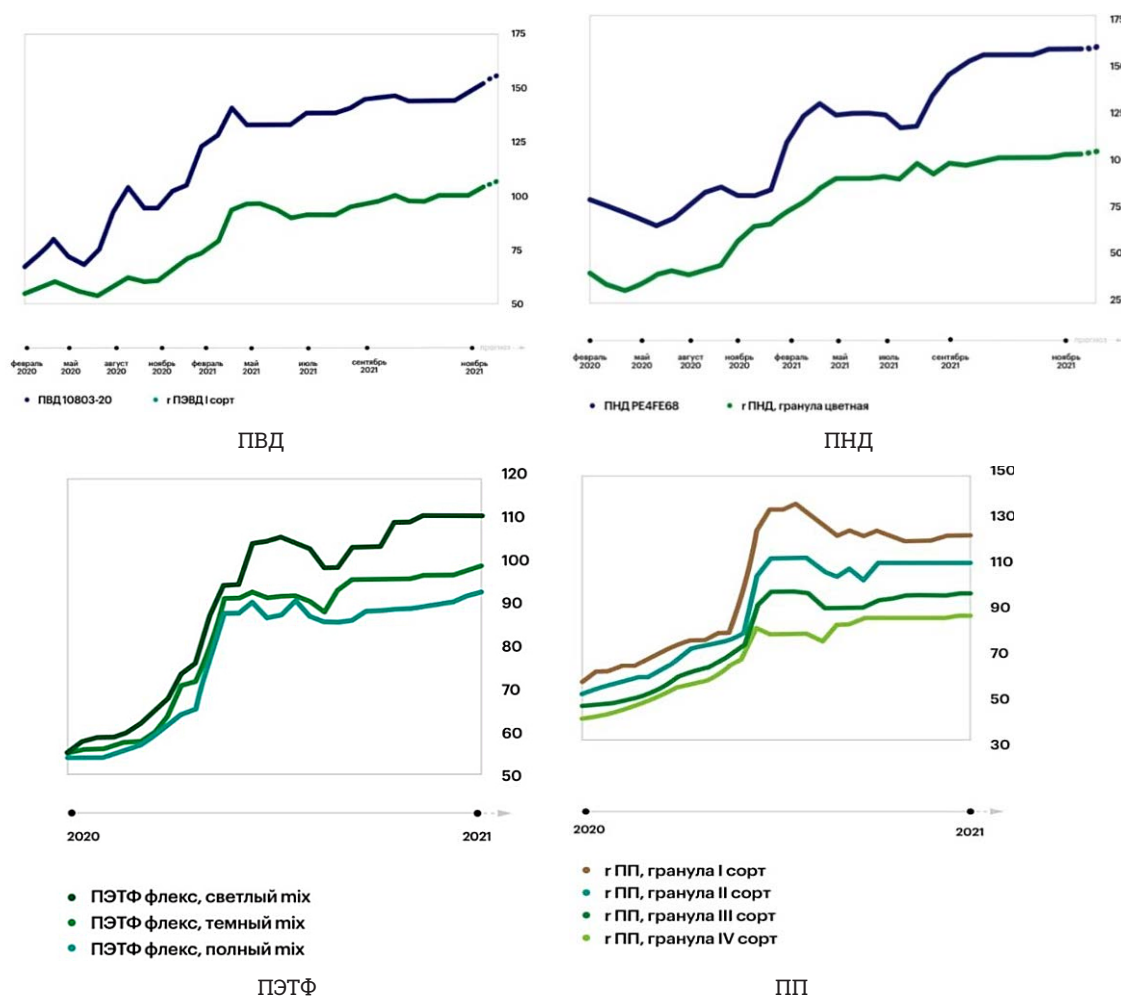
¹⁰ <https://sobirator.ru/ekocentr/>

¹¹ Анализ рынка // ООО «Айтиллект». — 2019.

¹² <https://plastinfo.ru/>

Рисунок 1

Стоимость вторичных полимеров, руб./кг, данные Союза Переработчиков Пластмасс, Росстат



ми ценовыми индексами (рисунок 1)^{13,14} (Волкова, 2020; Рзаев, 2018).

Но все же, нельзя не отметить, что основной спрос на полимерные отходы формируется за счет наиболее легких к вторичной переработке материалов — ПЭТФ бутылок, ПНД флаконов и канистр, лотков из различных видов пластика, пленок и др., всего того — что просто выделить из смешанных коммунальных отходов (Запорников, 2020; Абрамов, 2010; Шилкина, 2020).

При этом иные виды отходов, в т.ч. коррексы, где требуется дополнительная углубленная сортировка по видам, цвету и материалу, в виду отсутствия на российском рынке технологий автоматизированной сортировки полимеров, представляет уже проблему для операторов по сбору отходов (Фехретдинов, 2019; Смиранный, 2005; Тверитникова, 2018).

Наиболее технологически продвинутая схема сортировки отходов^{15,16}, применяемая в Российской Федерации в 2021 г. на смешанном потоке ТКО, представляет собой — оптический сенсор, выделяющий общую полимерную фракцию (все, кроме ПВХ), разделение на 2D/3D поток и далее оптические сенсоры на 3D применяются только на ПЭТФ: выделяя сначала данный материал из общего полимерного потока, а потом — отбирая наиболее ликвидные цвета: бесцветный и голубой.

Однако другие виды материалов, вследствие меньшего объема образования и относительной дороговизны автоматизированного решения, уже не подвергаются углубленной сортировке, а являясь визуально — неотличимыми, не могут быть эффективно отсортированы персоналом комплексов обработки (Рзаев, 2018; Запорников, 2020; Клинков, 2010).

¹⁵ Рециклинг полимеров в России // RUPEC. — 2017.

¹⁶ Ананьев, В. В., Губанова, М. И., Кирш, И. А., Семенов, Г. В., & Хмелевский, Г. К. (2006) Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов: учебное пособие. МГУПБ.

¹³ Анализ рынка // ООО «Айтиллект». — 2019.

¹⁴ <https://plastinfo.ru/>

С учетом международной практики раздельного сбора отходов по видам материалов, развития депозитной системы сбора тары и систем РОП и ПРО (PRO — producers responsibility organization), а также разнообразных видов муниципальных систем обращения с отходами, можно с уверенностью ответить, что эффективная модель сбора отходов — это комбинация различных систем, с разными участниками, но единой целью — снижения объема переработанных отходов^{17,18,19,20,21} (Запорожников, 2020; Абрамов, 2010; Шилкина, 2020; Задорожная, 2020; Пушкарева, 2019; Фехретдинов, 2019; Шварц, 2005; Ла Мантия, 2006).

Линии по сортировке ТКО включают не только ручную и магнитную сортировку, электросепарацию, но и другие стадии: аэросепарацию, флотацию, разделение в ПАВ средах и т.п. Такие методы, установленные на линиях, позволяют отделить большое количество фракций для последующей переработки механическим способом²² (Мюррей, 2004).

Современные комплексы по углубленной сортировке полимеров существуют в разных странах, например — завод Tomra в Лакштейне (Германия), который представляет собой уникальный набор оборудования, способный выполнить эффективную сортировку практически любых материалов до однородного вида сырья для последующей переработки^{23,24} (Шалгинских²⁵, 2021; Рассоха, 2021; Агаев, 2021; Хрущева, 2021).

Наибольшими перспективами развития подобных решений в Российской Федерации является создание

оператора по сбору отходов от использования товаров и упаковки в рамках РОП, в том числе путем внедрения депозитной системы на отдельные виды тарной упаковки, раздельного контейнерного сбора отходов в домовладениях и углубленной сортировки материалов в соответствии с международной практикой. Повышение затрат на полигонное захоронение отходов — является одним из элементов формирования эффективной системы обращения с отходами, стимулирующей участников к повышению своей эффективности.

Для альтернативных материалов упаковки, с точки зрения системы обращения с отходами, следует выделить следующие особенности.

Стекло представляет существенную проблему для операторов по обращению с отходами ввиду негативного влияния абразивных свойств битого стекла на движущиеся части мусоровозов и сортировочных линий, что увеличивает затраты на ремонт и стоимость процесса транспортирования таких материалов. Представляет проблему стекло и для мусоросжигающих заводов, так как происходит повышенный износ колосниковой решетки, вследствие — абразива. Увеличение расходов на транспортирование таких отходов, масса которых — в разы, выше аналогов²⁶.

Алюминий невозможно выделить из смешанных отходов простым магнитом и требует специального дорогостоящего оборудования²⁷.

Бумажные и картонные альтернативы при сохранении смешанного сбора — не смогут быть переработаны вторично и теряя свою ресурсную ценность, в лучшем случае — будут компостированы в техногенный грунт для пересыпки полигонов захоронения ТКО.

Биоразлагаемые полимерные материалы требуют формирования отдельной системы сбора для исключения возможности контаминации потока традиционных пластиков. Биоразлагаемые полимеры в случае попадания в поток традиционных полимеров будут влиять негативным образом на свойства вторичного материала, вплоть до полной потери функциональных свойств рециклата.

Биополимеры (биоразлагаемые полимеры), обычно используют в определенных областях применения, например — для производства пакетов, в целях исключения возможности перемешивания аналогичных видов отходов между собой.

¹⁷ Суворова, А. И., & Тюкова, И. С. (2008). *Вторичная переработка полимеров и создание экологически чистых полимерных материалов*. УрГУ им. А.М. Горького

¹⁸ Клиников, А. С., Беляев, П. С., Скуратов, В. К., Соколов, М. В., & Однолько, В. Г. (2010). *Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов*. Изд-во Тамб. ГТУ.

¹⁹ <https://ru.perspectives.refinitiv.com/market-insights/reformarasshirennoj-otvetstvennosti-proizvoditelej-v-kontekste-razvitiia-vtorichnoj-pererabotki-plastmass/> (дата обращения 12.12.2021)

²⁰ Губанов, Л. Н., Зверева, А. Ю., & Зверева, В. И. (2015). *Переработка и утилизация отходов упаковочных материалов*. ННГАСУ.

²¹ Рециклинг полимеров в России // RUPEC. — 2017.

²² PlastInfo (2018). Конференция «Вторичная переработка полимеров 2018»: Сжигать нельзя, переработать! <https://plastinfo.ru/information/articles/642/> (дата обращения 12.12.2021)

²³ Организация переработки отходов в Швеции (2020). Торговое представительство Российской Федерации в Швеции.

²⁴ Bravo, E. (September, 2021). *The German recycling system: the world's best recycling country*. Tomorrow city. <https://tomorrow.city/a/german-recycling-system> (дата обращения 12.12.2021).

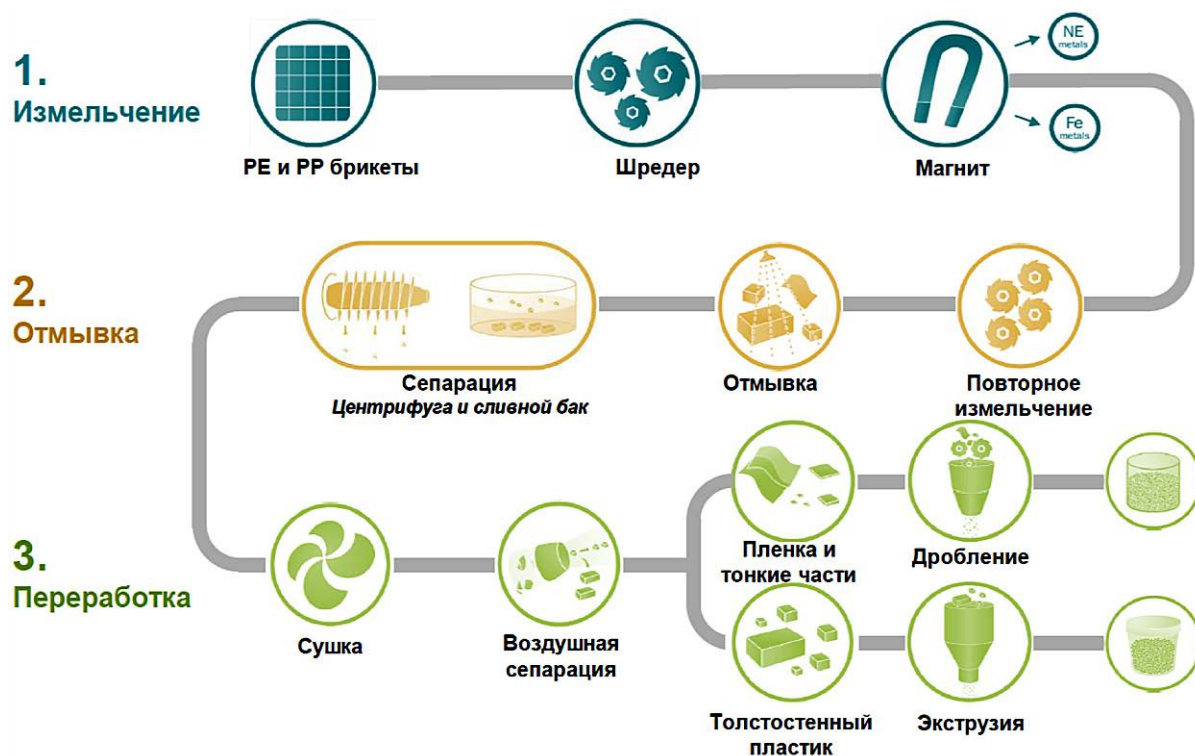
²⁵ Шалгинских, М. (2021). *Зарубежный опыт: как устроены раздельный сбор и переработка отходов в Германии*. Recycle. <https://recyclemag.ru/article/zarubezhnii-opit-ustroeni-razdelnoi-pererabotka-othodov-germanii> (дата обращения 12.12.2021)

²⁶ Медяник, Н. Л., Чупрова, Л. В., Куликова, Т. М., & Одуд, З. З. (2005). *Производство стеклянной тары*. ГОУ ВПО «МГТУ».

²⁷ Медяник, Н. Л., Варламова, И. А., Калугина, Н. Л., & Коляда, Л. Г. (2009) *Производство и утилизация металлической тары*. ГОУ ВПО «МГТУ»

Рисунок 2

Схема механического рециклинга на примере переработки ПЭ и ПП



Механическая переработка полимеров

При механической переработке отходов большое значение имеет **однородность материала** по типам и видам, их степень загрязнения, в том числе и остатками пищевых продуктов, особенно жиросодержащими и химическими компонентами. При смешанном сборе ТКО, осеменение и загрязнение органической фракцией негативно влияет на качество вторичного сырья — сохраняется неприятный запах, ограничивающий область дальнейшего использования вторичного сырья^{28,29,30} (Абрамов, 2010; Шварц, 2005; Ла Мантия, 2006).

Уровень потерь процесса подготовки полимеров к последующей переработке напрямую зависит от качества входящего сырья и разнится в зависимости от вида изделий, региона сбора, оператора по обработке и времени года, но в среднем — превышает 30 %. Речь идет в первую очередь про поверхностное загрязнение, остатки жидкости, органику, песок и иные материалы, которые

попали в кипы в виде коммерческого засора. При этом данные издержки несет переработчик³¹ (Абрамов, 2010).

При механической переработке полимерных отходов³² реализуются следующие этапы:

- сбор;
- сортировка и идентификация;
- подготовительные операции (измельчение, промывка, высушивание);
- переработка (для полимеров — грануляция и/или агломерация, смешение по рецептуре).

Процесс механического рециклинга можно схематично изобразить следующим образом (рисунок 2).

На производстве могут использоваться дополнительные стадии — уплотнение отходов, фильтрование и т.д. Экструдеры могут быть снабжены дегазаторами, ситами и т.п.

²⁸ Клинков, А. С., Беляев, П. С., Скуратов, В. К., Соколов, М. В., & Однолюк, В. Г. (2010). Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов. Изд-во Тамб. ГТУ.

²⁹ Губанов, Л. Н., Зверева, А. Ю., & Зверева, В. И. (2015). Переработка и утилизация отходов упаковочных материалов. ННГАСУ.

³⁰ Рециклинг полимеров в России (2017). RUPEC.

³¹ Клинков, А. С., Беляев, П. С., Скуратов, В. К., Соколов, М. В., & Однолюк, В. Г. (2010). Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов. Изд-во Тамб. ГТУ.

³² ГОСТ Р 54533–2011 (ИСО 15270:2008) Группа Т58. Национальный стандарт Российской Федерации ресурсосбережение обращение с отходами. Руководящие принципы и методы утилизации полимерных отходов

Принципы механической переработки полимеров подобны — в зависимости от целевого вида полимера, существует определенная конструкция ванн флотации, где материалы разделяются на разные потоки по разнице плотностей, температур плавления и тд. Оборудование, предназначенное для переработки ПЭТФ, не подходит для ПП и ПЭ, и других пластиков (Шварц, 2005; Ла Мантия, 2006).

Предприятия обычно используют несколько линий по переработке полимерных отходов, которые разделены по химической природе, по типам упаковки, например, пленки перерабатываются на линиях с агломераторами с последующей грануляцией, а литьевые и термоформованные упаковки — без агломераторов, сразу подаются в системы грануляции.

Большое значение для процесса механического рециклинга имеет подготовка материала — в зависимости от области применения вторичного сырья (рециклата), предъявляются различные требования к качеству материала и технологического процесса. Для формирования экономики замкнутого цикла и развития отрасли переработки вторичных материальных ресурсов, ключевым фактором является — эффективная модель сбора и обработки (сортировки) отходов от использования товаров и отходов упаковки товаров³³ (Ла Мантия, 2006)

Сохранение свойств и стабильность полимеров при их многократной переработке возможна в случае качественной сортировки. В ходе исследований подтверждено (Ла Мантия, 2006), что большинство полимеров могут перерабатываться многократно, при этом их физико-механические свойства уменьшатся незначительно по сравнению с исходными характеристиками.

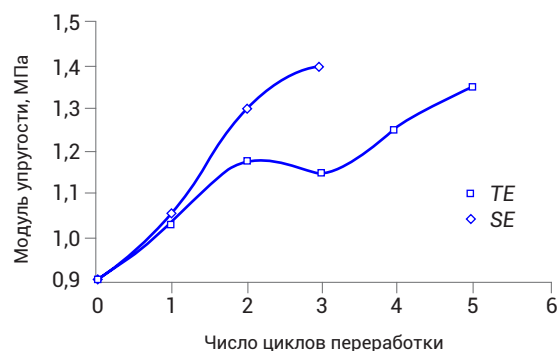
На рисунке 3 приведены данные для различных видов полимеров (Ла Мантия, 2006)

Аналогичные результаты были получены при исследовании ПЭ, ПП, ПА и ПЭТФ при многократной экструзии (Кирш, 2016; Тверитникова, 2019; Тверитникова, 2018; Иванов, 2017; Живоракин, 2017). Стоит также отметить, что молекулярная масса полимеров уменьшилась на 20–22 % за 4 цикла переработки (рисунок 4).

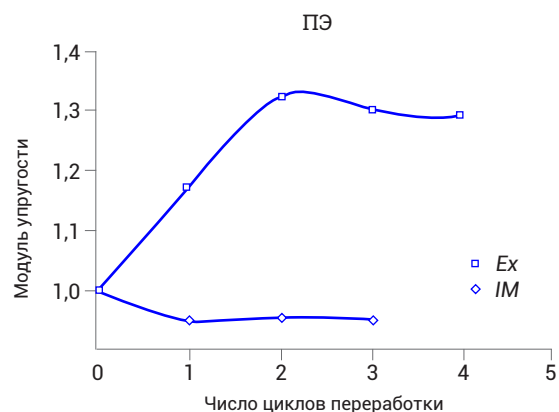
На практике, многие производители конечных товаров из вторичных полимеров, используют полимерный рециклат в виде хлопьев (как сырьевой материал), исключая этап гранулирования. В некоторых случаях, при использовании процессов сортировки для однотипной

Рисунок 3

Изменение модуля упругости ПЭ, ПП от количества циклов переработки



Модуль упругости образца ПЭВП, переработанного из контейнеров для жидкости в зависимости от числа циклов экструзии: TE — двухшнековый экструдер; SE — одношнековый экструдер

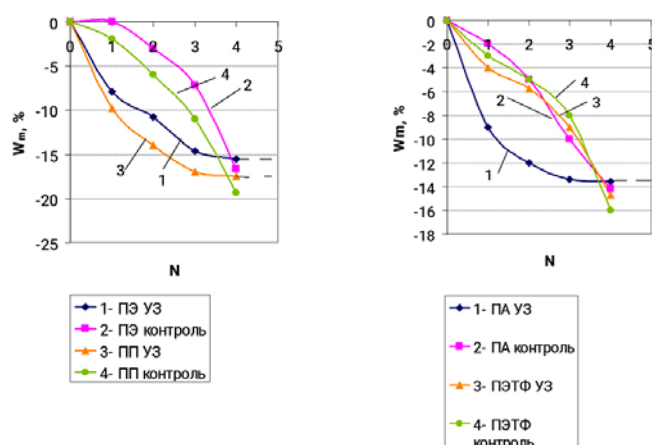


Модули упругости (в относительных единицах) двух образцов ПП — экструдированного (Ex) и полученного литьем под давлением (IM) — в зависимости от числа циклов переработки

ПП

Рисунок 4

Изменение молекулярной массы, W_m , %, полимера (а — ПЭ, ПП; б — ПА, ПЭТФ) от количества циклов переработки, N



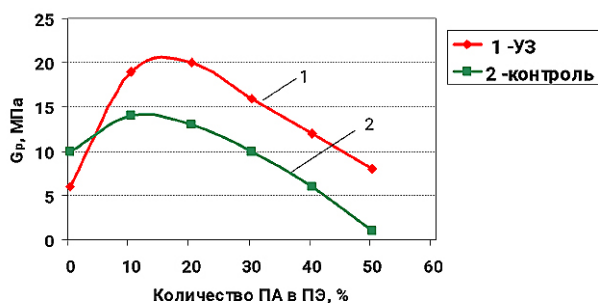
а)

б)

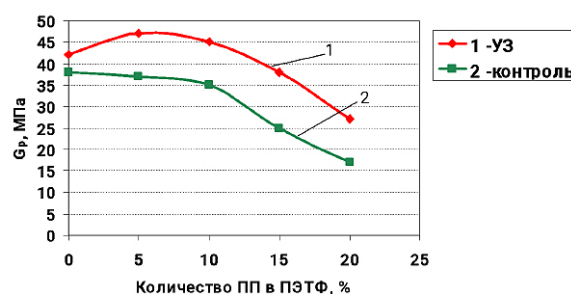
³³ Суворова, А. И., & Тюкова, И. С. (2008). Вторичная переработка полимеров и создание экологически чистых полимерных материалов. УрГу им. А.М. Горького

Рисунок 5

Зависимости разрушающего напряжения от количества вторичного ПА во вторичном ПЭ (а) и вторичного ПП во вторичном ПЭТФ (в)



а)



в)

группы полимерных отходов, операция сепарации после промывки и высушивания может быть исключена.

Переработка многослойных полимерных материалов может быть выполнена механическим способом^{34, 35, 36} (Kaiser, 2018). Полученный гранулят пригоден для технических областей применения, например, в дорожных покрытиях, полимер-наполненных изделиях, плитке, строительных материалах, битумных смесях и т.д.

Есть разработки технологий совмещения отходов многослойных материалов, состоящих из полимеров различной химической природы. В МГУПП разработана технология переработки таких отходов упаковки с использованием ультразвуковой (УЗ) обработки расплавов в процессе экструзии (Кирш, 2016). Доказано, что при УЗ обработки расплавов многослойных упаковок из ПЭ-ПА и ПП-ПЭТФ увеличивается технологический интервал совместимости, что позволяет получать вторичное полимерное сырье с улучшенными физико-механическими свойствами (рисунок 5) (Кирш, 2016).

Механический рециклинг является наиболее развитым в мире: как по объемам переработки, так и по технологиям. Существует огромное количество российских и международных компаний для выпуска вторичного сырья различного качества, в том числе имеющих допуск использования в качестве сырья для упаковки продуктов питания.

Переработать механическим образом возможно любые материалы, но качество вторичного сырья будет зависеть от оборудования от качества ВМР и этапов их предварительной подготовки – удаления загрязнений и прочих нецелевых материалов. При наличии определенных мер государственного регулирования возможно расширение спроса на вторичные пластики в отраслях хозяйственно-бытового применения, строительной отрасли, дорожном строительстве, и т.д.

Химическая переработка (рециклинг)

Химический рециклинг представляет собой процесс деполимеризации полимеров до производных – мономеров или нефтехимического сырья (нафты) для последующего вторичного синтеза при производстве полимеров и иных продуктов нефтехимии³⁷ (Damayanti & Wu, 2021).

Химические способы переработки можно классифицировать следующим образом: деполимеризация, гликолиз, метанолиз, гидролиз, термолиз, сольволиз и т.п. в зависимости от действующего фактора реакции. Как показывает мировой опыт, данные методы имеют большие перспективы для переработки одноразовой упаковки³⁸.

Химическая переработка направлена на обращение с более сложными фракциями отходов – смешанными и загрязненными. Кроме того, химическая переработка позволяет перерабатывать материалы много (в теории неограниченное число) раз.

³⁴ Baker, M. (2018). *How to eliminate plastic waste and plastic pollution with science and engineering*. <https://interestingengineering.com/science/how-to-eliminate-plastic-waste-and-plastic-pollution-with-science-and-engineering>

³⁵ Temming, M. (2021). *New recycling technologies could keep more plastic out of landfills* <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/new-recycling-technologies-could-keep-more-plastic-out-of-landfills>

³⁶ Эллис, Т. С. (2009). *Рециклинг полимерных смесей*. <https://plastinfo.ru/information/articles/257/>

³⁷ *Химическая переработка напоминает игру в лего: почему она может помочь сократить количество полигонов* (2021). <https://green.reo.ru/articles/tpost/kka1r4tv41-himicheskaya-pererabotka-napominaet-igru> (дата обращения 12.12.2021)

³⁸ ИТС 9–2020 нормативно-техническая документация «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами»

В мире очень много разновидностей нефтехимической продукции, как и технологий, которые наилучшим образом ориентированы на те или иные виды материалов с учетом их технологических, экологических и экономических особенностей. Далее приведены краткие сведения о вариантах переработки различных видов полимеров.

Большинство технологий химической переработки отходов упаковки находятся на стадии опытно-промышленных разработок, но многие методы уже реализованы в промышленности и имеют высокие показатели рен-

табельности (пилотная установка по вторичной переработке вспененного полистирола (ПС-В, EPS) мощностью 3,3 тыс. т в год PolyStyreneLoop (Нидерланды) в г. Тернёзене^{39, 40}. Полученные компоненты допустимо в дальнейшем использовать либо в качестве исходного продукта в реакциях образования полимерного сырья для промышленности, либо в других химических процессах.

С точки зрения переработки с получением ценного химического сырья, следует выделить следующие технологии химической переработки полиолефинов (ПЭ, ПП) (таблица 1).

Таблица 1

Основные технологии химической переработки упаковки ⁴¹

Наименование технологии / сырья	Описание технологии
Газификация / любой тип упаковки	Газификация протекает при температурах 1000–1200 °С в среде кислорода (иногда применяют пар), при использовании катализаторов температурные режимы газификации можно снизить до 800. Особенность данной технологии заключается в том, что в процессе газификации полимеров выделения низкомолекулярных веществ сводятся к минимальным значениям за счет нейтрализации выделяющихся кислородом или смесью пара с кислородом. Полученное сырье превращается в кокс, который агломерируется и измельчается и затем может использоваться как строительный материал для производства цемента и иных строительных материалов, в т.ч. прессованных брикетов для фундамента зданий и сооружений. Главным достоинством метода является возможность перерабатывать полимерные отходы без сортировки, а также возможность получение «зеленого» водорода. Метод газификации приобрёл особую популярность в Японии. При газификации упаковочного полимерного материала образуется смесь газов, которая впоследствии может быть использована как для производства новых полимеров, так и для вырабатывания тепловой и электрической энергии: электричества, метанола, кормовых белков и различной биомассы.
Термолиз (Пиролиз) / любой тип упаковки	Данная технология является одним из самых эффективных, но при этом дорогостоящих способов переработки полимерных отходов. При использовании термолиза, отходы обрабатываются под воздействием высоких температур, в специально оборудованных камерах без доступа кислорода. В результате химического процесса образуются газ, тепловая энергия и смесь жидких углеводородов — «синтетическая нефть». При расщеплении полимерных отходов методом термолиза доля нефти может достигать до 80% масс. от массы исходного полимера (в зависимости от жесткости процесса). Стоит отметить, что нефть — это ценное нефтехимическое сырье для получения этилена и пропилена, а также других ценных для нефтехимии продуктов (бутадиена, бензола и прочее). Процесс переработки представляет собой термическое разложение полимерных отходов при температурах (300–900° С) в условиях отсутствия кислорода. Данный процесс термического разложения полимерных отходов сопровождается выделением водорода и углеводорода с разной молекулярной массой и строением, которые можно использовать в качестве производства топлива и нового химического сырья. Данная технология предполагает очистку образующихся в процессе термолиза газообразных веществ (пиролизные газы или термолизные газы), которые нейтрализуются в камере дожигания с подачей кислорода. При этой технологии осуществляется очистка до 99% вредных веществ и выбросы минимальны (до 0,1%). В результате термолиза образуется твердый остаток, применение которому можно существует в строительной отрасли и дорожном хозяйстве.

³⁹ Пилотный завод по переработке вспененного полистирола откроют в июне 2021г. https://plastinfo.ru/information/news/47603_10.06.2021/

⁴⁰ Commercial-Scale Chemical Recycling at Work. <https://www.ptonline.com/blog/post/commercial-scale-chemical-recycling-at-work>

⁴¹ Кирш, И. А., Банникова, О. А., Безнаева, О. В., Губанова, М. И., Филинская, Ю. А., Новиков, М. Н., & Тверитникова, И. С. (2021). *Комплексная оценка целесообразности и социально-экономических последствий ограничения применения отдельных видов полимерной упаковки одноразового использования*. Отчет о НИР. МГУПП.

Продолжение Таблицы 1

Наименование техноло- гии / сырье	Описание технологии
	Данный метод, наравне с газификацией дает возможность перерабатывать многослойную упаковку, компоненты которой — алюминий и прочие термостойкие наполнители, которые механическим способом не всегда возможно переработать. Метод получил большое распространение в странах Западной Европы и сегодня активно развивается, благодаря мерам государственной поддержки.
Гидропирилиз/ любой тип упаковки	Процесс гидропирилиза полимерных отходов проводится в присутствии катализатора и водорода. Благодаря этому жидкие продукты гидропирилиза практически полностью состоят из парафиновых соединений, что позволяет без риска использовать его в качестве сырья для дальнейшего пирилиза с получением этилена и пропилена, а также позволяет получать стабильные компоненты моторных топлив с высокими характеристиками. Данный процесс имеет TRL около 6–8, и в скором времени может стать одним из самых распространенных процессов переработки пластиковых отходов практически любого качества и состава.
Термокатализ / поли- мерная упаковка без содержания металла	Термокатализ (каталитический пирилиз) является результатом дальнейшего развития и повышения эффективности технологии термоллиза за счет использования каталитических систем. Термокатализ протекает при более низких температурах (более мягкие условия процесса) по сравнению с термоллизом. При этом за счет каталитического воздействия, повышается селективность процесса, образуется больше нефти, происходит меньше побочных реакций с образованием смол и твердых остатков. Однако, термокатализ очень чувствителен к качеству сырья, поскольку металлы, которые могут содержаться в составе многослойной упаковки могут оказывать отравляющее воздействие на катализаторы, уменьшая их рабочий цикл. На данный момент ведутся разработки по превращению методом термокатализа полиолефинового сырья напрямую в этилен и пропилен для их повторного использования и получения полиолефинов. Сегодня уже используется технология термоллиза для получения из ПЭ и ПП отходов воска, компоненты различного рода защитных составов, смазок, эмульсий, пропиточных материалов и многое другое. При использовании таких технологий можно использовать сочетание полимеров без их разделения по ПЭ и ПП. Для преобразования таких термопластов, как низкомолекулярный ПЭ или атактический ПП, применяют низкотемпературный жидкофазный пирилиз в непрерывно или периодически работающих реакторах. В некоторых случаях в области низких температур находят применение реакторы с псевдооживленным слоем. Низкомолекулярный ПЭ пирилизуется при 400–450 °С, при этом получают алифатические богатые олефинами масла и алифатические воски. Атактический ПП термически разлагается в области температур 400–500 °С. Область рабочих температур в этом случае определяется перерабатываемым продуктом. Например, отходы ПВХ и побочные продукты выше 200 °С отщепляют хлороводород, а при дальнейшей термической обработке (выше 400 °С) разлагаются на технический углерод и углеводороды. Жидкофазный пирилиз ПС при температурах выше 350 °С ведет к образованию стирола с высоким выходом. Для получения низкомолекулярного сырья из таких особых видов отходов полимеров, как смеси термопластов, кабельная изоляция, применяют высокотемпературный пирилиз, при этом большая производительность достигается только в случае непрерывных методов. Образующиеся в процессе пирилиза низкомолекулярные предельные углеводороды подвергаются последующему крекингу с целью увеличения выхода непредельных соединений, используемых при синтезе полиолефинов. Разработаны также процессы каталитического гидрокрекинга для превращения полимерных отходов в бензин и топливные масла. Искусственное жидкое топливо является весьма перспективным направлением утилизации полимерных отходов. Разработанные в последнее время технологии позволяют получать высококачественные марки бензина, керосина, дизельного и котельного топлива.

Таблица 2

Проект	Страна	Технология, мощность	Год запуска	Поддерживающая мера
Plastic Energy (Sabic)	Нидерланды	Термолиз, 20 ттг	2022	субсидия от министерства экономики Нидерландов
Plastic energy (Exxonmobil)	Франция	Термолиз, 33 ттг	2023	Финансовая поддержка правительства Франции по программе Plan de Relance и региональный грант
KBR-Mura (Dow)	Великобритания	Термолиз в среде сверхкритической воды, 20 (80) ттг	2023	Грант от UK Research and Innovation
Brightmark energies	США	Термолиз 100 ттг	2020 – запущено	«Зеленые» облигации на 185 M USD

химической переработки пластиковых отходов (см. таблицу 3). Развитие технологии для выхода на устойчивую окупаемость и достижение необходимого уровня эффективности требует целенаправленной поддержки и инвестиций⁴³.

Рисунок 6

```

graph LR
    A[Смешанные полимерные отходы ПЭ, ПП, ПС] -- 1 --> B(Термолиз)
    B -- «Синтетическая нефть» --> C(Фракционирование)
    C -- «Синтетический газойль» --> D(Гидрокрекинг/ гидроочистка)
    C -- «Синтетическая нефтя» --> E(Пиролиз)
    D -- 5 --> F[Моторное и реакционное топливо]
    E -- 3 --> G[Этилен Пропилен]
    F -- 4 --> H(Производство полиолефинов)
    G -- 4 --> H
    H --> I(Производство изделий)
    I --> J(Потребление - ТК)
    J -- СУГи --> B
  
```

⁴³ Фурсова, И. В. (2021). России будет развиваться переработка упаковочных материалов. <https://rg.ru/2021/03/18/v-rossii-budet-razvivatsia-pererabotka-upakovocnyh-materialov.html>

Сортированные смешанные полимерные отходы из комплекса по переработке отходов (КПО) поступают на установку термолиза, которая состоит из следующих основных узлов:

- узел подачи полимерных отходов в реакторный блок. Главная цель — подать сырье в реактор, что, как правило, достигается комбинацией шнековой подачи и плавлением исходного сырья;
- реактор термолиза представляет собой автоклав без доступа кислорода, в котором происходит нагрев сырья и протекает основной процесс разложения с образованием продуктов реакции. Смесь газообразных продуктов поступает в блок конденсации и сепарации.
- блок конденсации и сепарации продуктов реакции предназначен для разделения продуктов реакции на газообразные (топливный газ, СУГи — сжиженный углеводородный газ), которые, как правило, используют в качестве топлива для поддержания температурного режима реакционной зоны, и жидкофазные продукты (нафта, керосин, дизельное топливо).
- блок очистки газообразных продуктов необходим для доочистки газообразных продуктов от примесей для их подачи в топливную сеть предприятия.

Обзор проектов химической переработки крупнейших химических и нефтехимических компаний (таблица 3).

Таблица 3
Обзор проектов химической переработки крупнейших химических и нефтехимических компаний⁴⁴

Компания	Перерабатываемые материалы	Метод переработки	Описание проекта / инициативы
Shell	Пластики	Химическая переработка	Планирует химически переработать 1 млн тонн пластиковых отходов к 2025 г. на своих нефтехимических мощностях
OMV / Borealis	ПЭТФ / ПП / ПЭ / ПС	Термолиз	СП по производству синтетического сырья для дальнейшей переработки в топливо и полимеры Действующий пилот 1 ттг в Вене. Планы по строительству мощности 200 ттг
Repsol	ПП / ПЭ / ПС	Термолиз	Использование синтетического сырья из пластиковых отходов от Plastic Energy и других производителей для производства дизельного топлива и полимеров
SABIC	ПП / ПЭ / ПС	Термолиз	Текущий объем переработки до 10 ттг отходов. Строится мощность 25 ттг
LyondellBasell	ПП / ПЭНД	Термолиз	Соглашение с Технологическим институтом Карлсруэ (Германия). Технология каталитического непрерывного процесса термолиза. Лабораторная стадия
DOW / DuPont	Пластики	Сбор и переработка	Формирование бизнес-модели с продукцией, полученной при помощи переработки пластика в ценные ресурсы, в Северной Америке и EMEA Сбор, переработка и инфраструктурные платформы для Dow и их локальных партнеров

⁴⁴ Кирш, И. А., Банникова, О. А., Безнаева, О. В., Губанова, М. И., Филинская, Ю. А., Новиков, М. Н., & Тверитникова, И. С. (2021). Комплексная оценка целесообразности и социально-экономических последствий ограничения применения отдельных видов полимерной упаковки одноразового использования. Отчет о НИР. МГУПП.

При анализе международного опыта, следует отметить, что мировой лидер в области производства стирольных полимеров INEOS STYROLUTION и канадский стартап в области технологии очистки полимеров POLYSTYVERT (Анжу, Квебек) работают совместно над переработкой полистирольного полимера для бытовых нужд в новый высококачественный полистирольный полимер. INEOS и POLYSTYVERT будут использовать запатентованный метод^{45,46} усовершенствованной переработки, при котором полимерные отходы, имеющие твердую форму, растворяются в сольвенте (растворителе). После процесса растворения можно механически и химически отделить примеси и добавки до окончательного отделения исходного полимера от растворителя. Конечным продуктом является очищенный полимер, который можно снова использовать в качестве основы для нового сырья. Сообщается, что технология глубокой очистки от POLYSTYVERT позволяет перерабатывать все типы сырья — от промышленных отходов до бытовых потоков.

Технологические этапы:

- 1) Полистирол контактирует с эфирным маслом (растворителем), которое за секунды растворяет его. Эфирное масло безопасно, и его можно легко повторно использовать для переработки большего количества материала;
- 2) Затем смесь растворенного полистирола в эфирном масле очищается для достижения высокого уровня чистоты для следующего этапа — отделения полистирола от эфирного масла;
- 3) Процесс разделения растворенного полистирола и эфирного масла лежит в основе технологии, на которую в настоящее время подан патент. Это решает главную проблему переработки полистирола — полное восстановление из эфирного масла. Даже незначительного количества оставшегося эфирного масла достаточно, чтобы повлиять на качество переработанного полистирола;
- 4) Конечный переработанный продукт гранулируется, в то время как эфирное масло повторно используется для следующего цикла растворения.

Переработанный по технологии POLYSTYVERT полистирол сохраняет те же свойства, что и чистый первичный полистирол, поскольку растворитель не модифицирует полимер. Кроме того, все процессы выполняются при низкой температуре, что сохраняет молекулярную цепочку полистирола нетронутой. Это позволяет получать высококачественный вторичный продукт. Благодаря высокому качеству, значительная часть этого продукта

может быть включена в различные готовые продукты, такие как изоляционные панели, подносы для пищевых продуктов и т.д. Его также можно напрямую экструдировать, как первичный полистирол, только с более благоприятными последствиями для экологии (Потравный, 2021).

Вовлечение ПЭТФ в замкнутый цикл является одной из главных задач сегодня, поскольку ПЭТФ имеет применение не только в упаковке, но и при производстве нитей, волокон, тканей и тп. На данный момент, в России за год образуется примерно 420–600 тыс. тн отходов ПЭТФ в виде использованных бутылок. Порядка 189 тыс. тонн вторичных материалов извлекается из отходов потребления и перерабатываются механически. При этом чистого вторичного сырья получается порядка — 150 тыс. тонн, поскольку на каждом этапе цепочки переработки ПЭТФ присутствуют потери.

Индустрию первичных полимеров ждет интеграция с отраслью вторичных, так как запросы рынка смещаются к повышенному спросу на переработанные полимеры, говорится в обзоре компании Refinitiv. По мнению компании, к 2030 году вторичное сырье будет частично замещать первичный полимер, в итоге — его доля в производстве преформ вырастет до трети совокупного потребления ПЭТФ.

Химическая переработка обычно проводится при высоких температурах и в присутствии катализаторов. Технологии химической переработки могут быть разделены на две части: (1) технологии, в которых полимеры растворяются в виде длинной цепи полимера, и (2) другие методы — это разрушение химических связей внутри полимерной цепи.

Так, например, в конденсационных полимерах, в сложных полиэфирах (ПЭТФ, поликарбонат (ПК)) и полиамидах (ПА), стандартным подходом является расщепление длинной цепи сложного эфира или амида. Напротив, в полиолефинах (полиэтилене и полипропилене) необходимо разорвать относительно стабильную углеродную цепь.

Существует множество методов переработки ПЭТФ с помощью химической переработки (таблица 4) (Damayanti, & Wu, 2021).

При анализе методов утилизации, хорошо заметны преимущества вторичной переработки полимеров по сравнению с альтернативными методами утилизации отходов.

Захоронение отходов на полигонах создаёт угрозу окружающей среде и усугубляет степень нанесения прямого вреда здоровью граждан (через загрязнение почвы, грунтовых вод и воздуха), что является наименее предпочтительным способом утилизации отходов;

⁴⁵ <https://www.ptonline.com/news/ineos-styrolution-partners-with-polystyvert-in-joint-developmenteffort-to-advance-circular-economy-for-ps>

⁴⁶ <https://www.recyclingtoday.com/article/agilyx-toyo-styrene-progress-polystyrene-recycling-facility-japan/>

Таблица 4

Основные методы химической переработки ПЭТФ⁴⁷

Наименование технологии	Описание технологии
Гидролиз	При гидролизе деполимеризация полимера происходит без участия дополнительных химических сред. Под воздействием электрического тока, энзимов либо др. реагентов происходит разделение молекул ПЭТФ на исходное сырье — МЭГ и ТФК. По итогу переработки полученного сырья можно получить ПЭТФ с содержанием вторичного сырья до 100%. С помощью щелочного гидролиза ПЭТФ деполимеризуется с получением этиленгликоля и солей терефталевой кислоты при умеренных температурах и давлениях. Затем соли терефталевой кислоты могут быть легко гидролизированы с использованием соляной или серной кислот. Обычно переработку ПЭТФ щелочным гидролизом проводят водным щелочным раствором NaOH или KOH с концентрацией до 4–20 масс.% Вре- мя реакции составляет 3–5 ч при температуре реакции до 210–250 °C и давлении 1,4–2 МПа. Кислотный гидролиз чаще всего проводят с использованием концентрированной серной кислоты, хотя также применяются и другие минеральные кислоты, такие как азотная или фосфорная кислота. Разложе- ние ПЭТФ при атмосферном давлении в 3–9 М серной кислоте при температуре ниже 150–190 °C в течение 12 часов. Выход терефталевой кислоты соответствует степени гидролиза ПЭТФ, но выход этиленгликоля снижается с увеличением концентрации серной кислоты из-за карбонизации спирта.
Метанолиз	Процесс разложения ПЭТФ путем метанолиза осуществляется в условиях высокой температуры и высоко- го давления с основными продуктами диметилтерефталата и этиленгликоля. Основным преимуществом процесса метанолиза является установка, которую можно разместить на линии производства полимеров. Кроме того, метанол и этиленгликоль могут быть быстро переработаны. В технологии метанолиза реакция деполимеризации происходит с вовлечением метанола, что приводит к получению двух элементов исходного сырья — моноэтиленгликоля (МЭГ) и диметилтерефталата (ДМТ). Для применения полученного сырья на традиционном оборудовании ПЭТФ требуется дополнительная стадия очистки ДМТ до терефталевой кислоты (ТФК). По итогу переработки сырья можно также получить ПЭТФ с содержанием вторичного сырья до 100%.
Гликолиз	Метод гликолиза подразумевает переработку низкокачественных ПЭТФ отходов (загрязненные бутылки, масляные, матовые и молочные бутылки, пищевые контейнеры и т.п.) путем разделения молекул пластика в слое горячего моноэтиленгликоля до состояния мономера (ВНЕТ или ДГЭТ). Процесс позволяет безо- пасно отделять все загрязнения, красители и др. химикаты, которые могут находиться в составе или на поверхности пластика от мономера ПЭТФ. После проведения реакции деполимеризации ВНЕТ загружается в традиционную технологичную линию ПЭТФ, что позволяет производить гранулы пластика с содержанием вторичного сырья до 100%. Процесс гликолиза может протекать в средах различных гликолей, с различными молярными отноше- ниями ПЭТФ/гликоль — до 1/0,5 ÷ 1/3 с температурой реакции при 170–245 °C и выходом производных терефталевой кислоты до 80 %. Недостатки этого процесса — дорогая стадия разделения и очистки состава смеси от продуктов реакции, таких как гликоли, спирты и производные терефталата. Однако постоянный спрос и рост цен на химиче- ское сырье делает данную технологию перспективной.
Ферментативный гидролиз	Ферментативный гидролиз предлагает биотехнологический путь разложения ПЭТФ в мягких условиях, но с серьезными ограничениями, такими как потребность в аморфном или низкокristаллическом ПЭТФ, необходимом для правильной активности ферментов ПЭТазы. Наиболее продвинутой ферментативной деградация ПЭТФ осуществляется французской компанией Carbios, которая сотрудничает с крупнейшими промышленными предприятиями по производству ферментов. Компания Novozymes из Дании собирается полностью перейти на процесс ферментативной переработки ПЭТФ. Преимущества этого процесса — экологичность и низкая стоимость, например, 3 кг фермента могут разло- жить 1000 кг ПЭТФ стоимостью до 63 евро.

⁴⁷ Кирш, И. А., Банникова, О. А., Безнаева, О. В., Губанова, М. И., Филинская, Ю. А., Новиков, М. Н., & Тверитникова, И. С. (2021). Комплекс-
ная оценка целесообразности и социально-экономических последствий ограничения применения отдельных видов полимерной
упаковки одноразового использования. Отчет о НИР. МГУПП.

Мусоросжигание позволяет снизить нагрузку на полигоны, но также оказывает негативное влияние на окружающую среду (выбросы при сжигании), потребность в утилизации зольного остатка и удорожании стоимости электроэнергии для потребителей при профиците энергоносителей в зонах реализации проектов по строительству мусоросжигающих заводов в Российской Федерации;

Механическая (вторичная) переработка позволяет перерабатывать наиболее ценные однородные фракции полимерных отходов в новые полимерные материалы, позволяя сохранить ценность произведенного ранее материала. Данный метод имеет ряд ограничений по использованию продуктов переработки в пищевой упаковке в виду возможной миграции вредных веществ в продукт.

Химическая переработка позволяет решить проблему переработки сложных композиций упаковки, переработка которой либо не возможна механическим путем или же отсутствует возможность глубокой сортировки отходов. По сравнению с альтернативой позволит:

- в 6 раз снизить выбросы CO₂ по сравнению со сжиганием, в случае утилизации отходов путем химической переработки (экологический эффект);
- снизить расходы государства на полигонное захоронение отходов;
- создаст возможность не повышать тариф по вывозу ТКО для населения, в отличие от неизбежного повышения тарифа для населения, в случае передачи ТКО на энергетическую утилизацию;
- использовать отход в новой цепочке создания стоимости, что обеспечит дополнительные налоги РФ при появлении новой отрасли переработки отходов (ежегодная оценка — около 15 млрд. руб., при реализации проектов химической и механической переработки отходов;
- создать в экономике свыше тысячи новых высокотехнологичных рабочих мест в создаваемой отрасли химической переработки;
- повысить рейтинг РФ по устойчивому развитию отечественной промышленности на международной арене.

Таким образом, сочетание технологий механической и химической переработки в системе обращения с отходами, способно обеспечить высокие уровни переработки полимерных отходов. Тенденции для сокращения

ТКО связаны напрямую с переработкой отходов и получением вторичного сырья или альтернативных источников энергии или сырья (топливо или химические агенты). Для того чтобы облегчить рециклинг, можно сформулировать несколько основных правил, из которых, разумеется, могут быть исключения:

- маркировка упаковки облегчает последующую идентификацию материалов;
- следует провести научные исследования влияния многократной переработки многослойных упаковочных материалов и выделением упаковочных материалов, сочетающих функциональные свойства, и переработку с учетом даунциклинга (с понижением качества вторичного сырья) или химических / химико-термических способов переработки;
- расширить рынки сбыта вторичного полимерного сырья, включая дотации предприятиям по их переработке и реализации.

ВКЛАД АВТОРОВ

Кирш И.А.: задумала идею статьи, осуществляла руководство коллективом авторов, провела обобщение полученных результатов, написала заключение.

Овсянников С.А.: выполнил литературный обзор публикаций.

Безнаева О.В.: провела экспериментальную оценку эффективности вторичной переработки полимерных материалов, предоставила данные

Банникова О.А.: провела экспериментальную оценку эффективности функциональных свойств упаковки после рециклинга, предоставила данные

Губанова М.И.: разработала методологию проведения экспериментальных работ, выполнила проверку конечной версии рукописи и перевод.

Новиков М.Н.: провел оценку экономической эффективности повторной переработки отходов одноразовой упаковки.

Тверитникова И.С.: выполнила оформление рисунков, написание текста рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов, В. В., & Чалая, Н. М. (2010). Вторичная переработка полимерных отходов: анализ существующих методов. *Полимерные материалы*, (11), 25–29.
- Волкова, А. В. (2020). *Рынок крупнотоннажных полимеров*. НИУ ВШЭ.
- Губанов, Л. Н., Зверева, А. Ю., & Зверева, В. И. (2015). *Переработка и утилизация отходов упаковочных материалов*. ННГАСУ.
- Живоракин, Н. С., Кубышкин, А. И., Баруля, И. В., Кирш, И. А., & Банникова, О. А. (2017). Модификация полиолефинов силанами. В *Живые системы и биологическая безопасность населения* (с. 97–98).
- Задорожная, Л. Е. (2020). Мировая и отечественная практика безотходного производства посредством перехода к циркулярной экономике. *Экономический вестник ИПУ РАН*, (1), 106–124.
- Запорников, В. А. (2020). Рециклинг полимеров в России как часть мусорного кризиса. *Полимерные материалы*, (5), 34–36.
- Иванов, А. Б., Тверитникова, И. С., Будаева, В. А., Кирш, И. А., & Безнаева, О. В. (2017). Вторичная переработка отходов упаковки различной химической природы. В *Живые системы и биологическая безопасность населения* (с. 97).
- Кирш, И. А. (2016). *Установление закономерностей влияния ультразвукового поля на физико-химические свойства и структуру расплавов полимеров при их вторичной переработке*. [Докторская диссертация, Ивановский государственный химико-технологический университет]. Иваново, Россия.
- Ла Мантия, Ф. (2006). *Вторичная переработка пластмасс*. Профессия.
- Мюррей, Р. (2004). Цель — Zero Waste. ОМННО «Совет Гринпис».
- Потравный, И. М., & Баах, Д. (2021). Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов в контексте низкоуглеродного развития. *Управленческие науки*, 11(3), 6–22. <https://doi.org/10.26794/2404-022X-2021-11-3-6-22>
- Пушкарева, А. С. (2019). Эффективные методы переработки мусора: Швеция. *Молодой ученый*, 2(240), 77–78.
- Рассоха, А. В. (2017). Рециклинг: опыт зарубежных стран и России. *Universum: Экономика и юриспруденция*, 6(39).
- Рзаев, К. В. (2018). Российский рынок вторичной переработки пластмасс: состояние, тенденции, перспективы. *Полимерные материалы*, (8), С. 8–14.
- Смиренный, И. Н., Беляев, П. С., Клинков, А. С., & Ефремов, О. В. (2005). *Другая жизнь упаковки*. Першина.
- Тверитникова, И. С., Кирш, И. А., Кондратова, Т. А., & Кубышкин, А. И. (2019). Разработка многослойных упаковочных материалов с использованием полиолефиновых отходов для хранения пищевой продукции. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 10–19.
- Тверитникова, И. С., Кирш, И. А., & Федоренко, Б. Н. (2018). Разработка технологии переработки отходов упаковки без их сортировки. В *Биотехнология и продукты биоорганического синтеза*, (с.324–331).
- Фехретдинов, Р. Н., Чарикова, К. А., & Дивина, О. А. (2019). Переработка отходов пластмасс в России. *Твердые бытовые отходы*, (1), 28–31.
- Шварц, О., Эбелинг, Ф.-В., & Фурт, Б. (2005). *Переработка пластмасс*. Профессия.
- Шилкина, С. В. (2020). Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России. *Отходы и ресурсы*, 7(1), 1–17.
- Damayanti, & Wu, H.-S. (2021). Strategic Possibility Routes of Recycled PET. *Polymers*, 13(9), 1475. <https://doi.org/10.3390/polym13091475>
- Kaiser, K., Schmid, M., & M Schlummer, M. (2018). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 1; <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>

REFERENCES

- Abramov, V. V., & Chalaya, N. M. (2010). Recycling of polymer waste: analysis of existing methods. *Polimernye materialy* [Polymeric materials], (11), 25–29.
- Volkova, A. V. (2020). *Rynok krupnotonnazhnyh polimerov* [The market of large-capacity polymers]. NRU HSE.
- Gubanov, L. N., Zvereva, A. Yu., & Zvereva, V. I. (2015). *Pererabotka i utilizatsiya othodov upakovочnyh materialov* [Recycling and disposal of waste packaging materials]. NNGASU.
- Zhivorakin, N. S., Kubyshkin, A. I., Barulya, I. V., Kirsh, I. A., & Bannikova, O. A. (2017). Modification of polyolefins with silanes. In *Zhivye sistemy i biologicheskaya bezopasnost' naseleniya* [Living systems and biological safety of the population] (pp. 97–98).
- Zadorozhnaya, L. E. (2020). World and domestic practice of non-waste production through the transition to a circular economy. *Ekonomicheskij vestnik IPU RAN* [Economic Bulletin of IPU RAS], (1), 106–124.
- Zapornikov, V. A. (2020). Polymer recycling in Russia as part of the waste crisis. *Polimernye materialy* [Polymer Materials], (5), 34–36.
- Ivanov, A. B., Tveritnikova, I. S., Budaeva, V. A., Kirsch, I. A., & Beznaeva, O. V. (2017). Recycling of packaging waste of various chemical nature. In *Zhivye sistemy i biologicheskaya bezopasnost' naseleniya* [Living systems and biological safety of the population] (p. 97).
- Kirsch, I. A. (2016). *Ustanovlenie zakonornostej vliyaniya ul'trazvukovogo polya na fiziko-himicheskie svoystva i strukturu rasplavov polimerov pri ih vtorichnoj pererabotke* [Establishment of regularities of the influence of ultrasonic field on the physicochemical properties and structure of polymer melts during their secondary processing] [Doctoral dissertation, Ivanovo State University of Chemical Technology]. Ivanovo, Russia.
- La Mantle, F. (2006). *Vtorichnaya pererabotka plastmass* [Recycling of plastics]. Professia.
- Murray, R. (2004). *Cel' — Zero Waste* [The goal is Zero Waste]. UMNO Greenpeace Council.
- Potravny, I. M., & Baach, D. (2021). Energy utilization of municipal solid waste in the context of low-carbon development. *Up-ravlencheskie nauki* [Management Sciences], 11(3), 6–22. <https://doi.org/10.26794/2404-022X-2021-11-3-6-22>
- Pushkareva, A. S. (2019). Efficient Waste Recycling Practices: Sweden. *Molodoj uchenyj* [Young Scientist], 2(240), 77–78.
- Rassokha, A. V. (2017). Recycling: experience of foreign countries and Russia. *Universum: Ekonomika i yurisprudenciya* [Universum: Economics and Jurisprudence], 6(39).
- Rzaev, K. V. (2018). Russian market of plastic recycling: state, trends, prospects. *Polimernye materialy* [Polymeric materials], (8), pp. 8–14.
- Smirenniy, I. N., Belyaev, P. S., Klinkov, A. S., & Efremov, O. V. (2005). *Drugaya zhizn' upakovki* [Another life of packaging]. Pershina.
- Tveritnikova, I. S., Kirsch, I. A., Kondratova, T. A., & Kubyshkin, A. I. (2019). Development of multilayer packaging materials using polyolefin waste for food storage. *Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ya* [Storage and Processing of Farm products], (1), 10–19.
- Tveritnikova, I. S., Kirsch, I. A., & Fedorenko, B. N. (2018). Development of packaging waste processing technology without sorting. In *Biotehnologiya i produkty bioorganicheskogo sinteza* [Biotechnology and products of bioorganic synthesis], (p.324–331).
- Fekhetdinov, R. N., Charikova, K. A., & Divina, O. A. (2019). Recycling of waste plastics in Russia. *Tverdye bytovye othody* [Municipal Solid Waste], (1), 28–31.
- Schwartz, O., Ebeling, F.-W., & Furth, B. (2005). *Pererabotka plastmass* [Plastics processing]. Professia.
- Shilkina, S. V. (2020). World trends in waste management and analysis of the situation in Russia. *Othody i resursy* [Waste and Resources], 7(1), 1–17.
- Damayanti, & Wu, H.-S. (2021). Strategic Possibility Routes of Recycled PET. *Polymers*, 13(9), 1475. <https://doi.org/10.3390/polym13091475>
- Kaiser, K., Schmid, M., & M Schlummer, M. (2018). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, 3(1), 1; <https://doi.org/10.3390/recycling3010001>