

УДК 541.64:542.9

## ПОЛИМЕРНЫЕ ТВЕРДЫЕ КОММУНАЛЬНЫЕ ОТХОДЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И МЕТОДЫ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

© 2021 г. В. С. Петросян<sup>a,b,c,\*</sup>, А. Е. Шипелов<sup>c</sup>, Е. А. Шувалова<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Химический факультет  
119991 Москва, Ленинские горы, 1, строение 3, Россия

<sup>b</sup> Российская академия естественных наук. Секция химии  
19002 Москва, пер. Сивцев Вражек, 29/16, Россия

<sup>c</sup> Акционерное общество “РТ-Инвест”  
119180 Москва, ул. Малая Якиманка, 10, Россия

\*e-mail: valpetros@mail.ru

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

После доработки 29.04.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В последние годы проблема переработки полимеров встала довольно остро в связи с накоплением в окружающей среде огромных количеств непереработанных полимерных твердых коммунальных отходов. Авторы обсуждают основные экологические проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды полимерными отходами, а также современные методы разделения, переработки (включая переработку во вторичные материальные ресурсы и термическую переработку в тепловую и электрическую энергию) и оценки жизненных циклов полимерных твердых коммунальных отходов.

DOI: 10.31857/S2308114721020072

### ВВЕДЕНИЕ

Полимерные твердые коммунальные отходы относятся в основном к бионеразлагаемым веществам, которые при накоплении в окружающей среде способны вызывать ряд негативных последствий: блокировку дренажных систем, выброс токсичных газов в атмосферу, умерщвление водной биоты и другие эффекты, наносящие ущерб здоровью людей, состоянию окружающей среды и мировой экономике [1–12].

В связи с накоплением в окружающей среде огромных количеств полимерных твердых коммунальных отходов [2–12] особенно остро стоит проблема их переработки. Уже в 70-е годы XX века [3] в Мировом океане были обнаружены скопления плавающих на поверхности воды полимерных отходов, которые за эти годы превратились в целые острова, расположенные в центрах основных систем океанических течений [4, 5, 7–12].

Такие скопления отходов стали называть “мусорными пятнами” и “пластиковыми островами”. Оба термина, однако, недостаточно корректны. По словам Анжелики Уайт, доцента из Университета штата Орегон (США), которая подробно изучает данную проблему, полимерное загрязнение в Мировом океане нельзя называть островами или пятнами, поскольку оно представ-

ляет собой скорее “диффузный суп” из плавающих в океане полимеров, который не виден из космоса. У этих загрязнений нет границ, и их реальные размеры определить не представляется возможным [13].

Широко известны три наиболее крупных полимерных загрязнения: Большое тихоокеанское, Индоокеанское и Североатлантическое, однако подобные “пятна” существуют также в южных частях Атлантики и Тихого океана, т.е. во всех пяти основных системах течений [2, 8, 9, 11, 12].

Исследования [4], проведенные в 2017 г. учеными из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре и Университета штата Джорджия (США), показали, что из 9.1 млрд тонн полимеров, произведенных с 1950 г., примерно 7 млрд тонн больше не используется. Переработке при этом было подвергнуто не более 9%; еще 12% было сожжено. Таким образом, 5.5 млрд тонн полимерных отходов засоряют водные и террестриальные экосистемы.

В другом исследовании 2017 г. [10], проведенном учеными из Австралии (Институт морских и антарктических исследований Университета Тасмании), внимание было уделено проблеме загрязнения полимерными отходами морского дна. Был показан высокий уровень полимерного за-

грязнения вдоль юго-восточного побережья Австралии. Большая концентрация полимеров наблюдалась не только вблизи прибрежных зон крупных городов, но и в отдаленных районах. Образцы морского осадка отбирали на глубине от 5 до 13 метров.

В 2020 г. группой исследователей из этого же университета было впервые зафиксировано загрязнение полимерами морского льда в Антарктике [6]. В проанализированном ледяном керне, собранном в Восточной Антарктиде, было выявлено 96 микрочастиц из 14 различных типов полимеров.

### НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Оказываясь в водной среде, полимеры фотодegradируют до полимерных микрочастиц – так называемых микропластиков [1] и поступают в пищевые цепи животных и водоплавающих птиц. Фотодegradация полимеров происходит в поверхностной пленке воды – месте обитания нейстона [14], и сопровождается распадом твердых коммунальных отходов на все более мелкие частицы, остающиеся при этом полимерами. Данный процесс продолжается до образования частиц молекулярного уровня [15].

В организмы крупных животных полимеры могут поступать как напрямую с водой, так и в ходе употребления в пищу планктона, нейстона и мелких животных, поглощающих микрочастицы полимеров. В больших количествах крупные частицы полимеров обнаруживаются в пищевом тракте выбросившихся на берег кашалотов и прибрежных птиц (черноногие альбатросы, чайки и т.д.). Животные также могут получать механические повреждения при контакте с полимерными отходами, попадать в полимерные сетки и кольца, из которых не могут выбраться, и поэтому погибают. Больше всего этому явлению подвержены морские черепахи.

Помимо механических повреждений полимерное загрязнение водной среды опасно также и тем, что на микроскопическом уровне обломки отходов могут поглощать органические загрязнители из морской воды, включая полихлорированные дибензодиоксины, инсектицид ДДТ и полициклические ароматические углеводороды [16]. Попадание этих веществ с частицами микропластиков в живые организмы вызывает разнообразные токсические последствия [17], среди которых особое место занимают гормональные нарушения.

Микропластики поглощаются мелкими организмами и рыбой, которая в свою очередь становится пищей для человека, накапливающего та-

ким образом в своем организме большое количество высокотоксичных веществ.

Токсичные вещества могут поступать в окружающую среду из самих полимеров. Например, бисфенол А, фталаты и полихлорированные бифенилы вымываются из некоторых полимерных отходов в процессе их фотодegradации, что приводит к дополнительному загрязнению окружающей среды высокотоксичными соединениями.

Эффективного метода очистки Мирового океана от существующего полимерного загрязнения пока не изобретено, однако ясно, что первоочередной глобальной задачей человечества на данный момент является прекращение поступления потока полимерных отходов в окружающую среду с помощью отдельного сбора твердых коммунальных отходов и их последующей переработки во вторичные материальные ресурсы, потому что только в 2015 г. было произведено более 322 млн тонн полимеров во всем мире, и ожидается, что к 2050 г. этот показатель увеличится вдвое [18].

### ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В основе эффективной переработки полимерных твердых коммунальных отходов, как и любых других отходов, лежит их систематическое, корректное разделение, поскольку каждый существующий тип полимера может быть переработан только в аналогичный продукт. Именно этот аспект усложняет процесс переработки полимерных твердых коммунальных отходов. Их небрежный сбор и сортировка автоматически будут влиять на качество полученного впоследствии нового продукта.

В общем потоке твердых коммунальных отходов можно выделить следующие типы полимерных отходов: вышедшие из употребления упаковка и тара, отработанное электронное и электротехническое оборудование, всевозможные предметы быта с истекшим сроком службы. Отсюда следует, что разделение полимерных твердых коммунальных отходов зачастую является достаточно большой проблемой в области управления отходами. Усложняют процессы разделения и переработки полимерных твердых коммунальных отходов всевозможные загрязнители, которые могут находиться на их поверхности, а также добавки, введенные в полимерный материал в процессе изготовления продукта потребления: пластификаторы, красители, тепло- и светостабилизаторы, другие вещества и материалы, придающие полимерам особые физико-химические свойства.

Хорошо отсортированные и пригодные для переработки полимерные твердые коммунальные отходы позволяют сделать жизненные циклы не-

которых полимеров [19, 20] “закрытыми” от окружающей среды и обеспечить экономию нефти, потребляемой промышленностью при изготовлении новой продукции.

В глобальном масштабе примерно 4% таких невозобновляемых ресурсов, как нефть и газ, можно было бы сохранить при производстве первичных полимеров, и еще 3–4% – на энергии для ее производства [21].

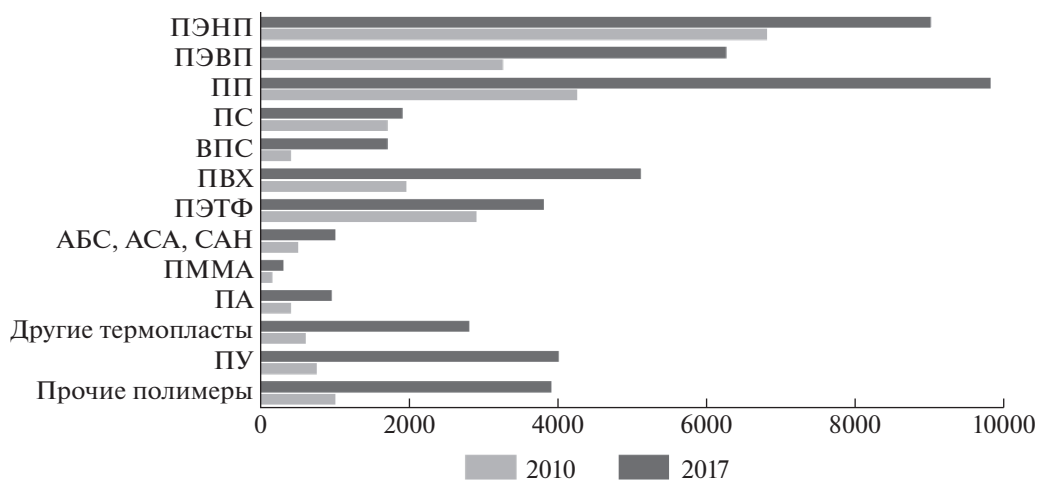
Поскольку смешанный поток несортированных твердых коммунальных отходов содержит широкий спектр полимерных отходов, было принято решение маркировать полимерные продукты потребления особым идентификационным номером (Resin identification code, RIC), в зависимости от их химического состава. На данный момент все виды полимерных изделий подразделяются с помощью такой системы маркировки на семь категорий: 1 – полиэтилентерефталат, 2 – полиэтилен высокой плотности, 3 – поливинилхлорид, 4 – полиэтилен низкой плотности, 5 – полипропилен, 6 – полистирол, 7 – другие полимеры.

Символически знак RIC выражается в настоящий момент не только числом от 1 до 7, но и соот-

ветствующей аббревиатурой и тремя зацикленными вокруг стрелками или непрерывным треугольником. Следует отметить, что маркировка RIC указывает только на определенный вид материала, а не свидетельствует о пригодности конкретного продукта для переработки во вторичные материальные ресурсы. Основной целью данного обозначения является обеспечение эффективной сортировки полимерных твердых коммунальных отходов по их типу [22].

## МАСШТАБЫ МИРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРОВ

Полиэтилен низкой и высокой плотности, а также полипропилен являются наиболее распространенными полимерами в общем потоке твердых коммунальных отходов. Их доминирование объясняется широким применением в создании упаковок и тары, на которые приходится больше половины всех полимерных отходов. Ниже показано, как изменялся состав и количество полимерных отходов в странах Евросоюза (плюс Норвегия и Швейцария) за 7 лет с 2010 г. (24.7 млн тонн) [23] по 2017 г. (51.2 млн тонн) [24].



(ВПС – вспененный ПС, АБС – акрилонитрил-бутадиен-стирол, АСА – акрилонитрил-стирол-акрилат, САН – стиролакрилонитрил, ПУ – полиуретан (по Villanueva A., Eder P., 2014; PlasticsEurope, 2018)).

Статистические данные указывают на то, что на рынке ЕС доминируют четыре вида полимеров: ПЭ, ПП, ПВХ и ПЭТФ. Их доля составляет как минимум 75% спроса на всю полимерную продукцию. За последние годы также возросло производство ПУ и полимеров на основе стирола (ПС и вспененный ПС). В 2015 г. производство полимеров в Европе составляло 58 млн т [11], достигло пиковой отметки в 64.4 млн тонн в 2017 г.

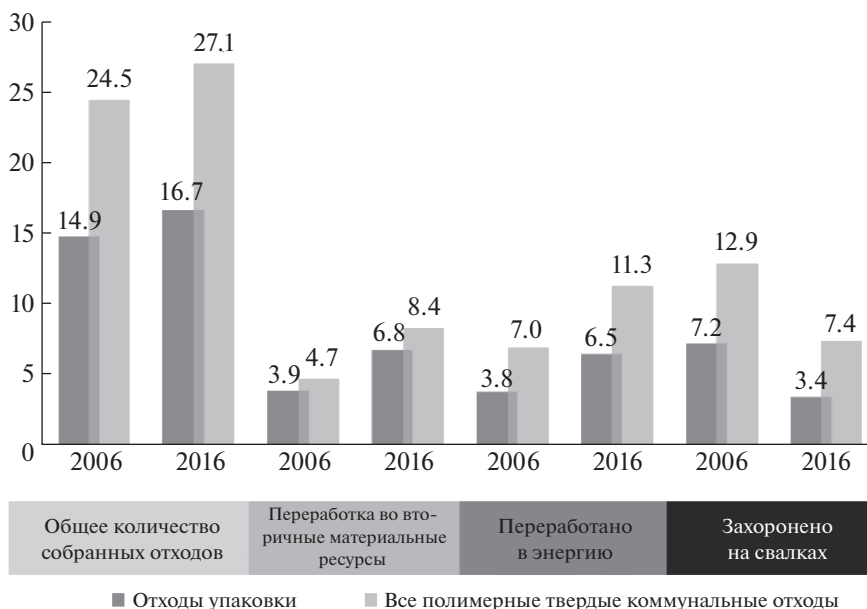
и снизилось до 61.8 млн тонн в 2018 г. [25]. В глобальном масштабе эти цифры пока демонстрируют неуклонный рост: 322 млн тонн (2015 г.), 348 млн тонн (2017 г.) и 359 млн тонн (2018 г.).

Крупнейшим производителем полимеров является Китай. В 2016 г. на его долю пришлось 29% мирового потока полимерной продукции (термопласты и полиуретаны). Второе и третье место заняли Европа (19%) и Северная Америка (18%). Неуклонное увеличение спроса на полимерную продукцию позволяет предполагать, что объемы производства полимеров будут расти и дальше.

За 10 лет (с 2006 по 2016 гг.) процент полимерных отходов, подвергаемых переработке, вырос

в Европе почти на 80%, и на 75% увеличился уровень переработки полимерной упаковки. Доля за-

хоронения, напротив, снизилась на 43 и 53% соответственно.



В 2016 г. из 27.1 млн тонн отдельно собранных полимерных отходов (28 стран ЕС + Норвегия и Швейцария) переработке подверглись 72.7%, из которых 31.1% были переработаны во вторичные материальные ресурсы, а 41.6% – в энергию;

27.3% полимерных твердых коммунальных отходов было захоронено. Ниже приведено процентное соотношение видов переработки полимерных твердых коммунальных отходов в странах Европы в 2016 г. (PlasticsEurope, 2018).



При этом из 16.7 млн тонн отсортированных отходов полимерной упаковки (40.9%) было подвергнуто переработке во вторичные материальные ресурсы, 38.8% – в энергию и 20.3% захоронено.

### ОСОБЕННОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Проблема переработки полимерных твердых коммунальных отходов в новые продукты потребления заключается в основном в необходимости

их тщательного разделения, по крайней мере на семь типов, о которых речь шла выше. В наибольшей степени это касается ПЭТФ, ПЭ и ПП, которые являются основными компонентами смесей полимеров, встречающихся в твердых коммунальных отходах, а также отделения бутылок из ПЭТФ от их крышек из ПВХ. Некоторые полимеры, например, ПВХ и ПЭТФ, настолько несовместимы друг с другом, что попадание хотя бы одного несоответствующего объекта (одной ПВХ-бутылки в смесь из 2000 ПЭТФ-бутылок) может привести к дальнейшей непригодности всей партии.

С экономической и социальной точек зрения на уровне домохозяйств практически невозможно создать такую систему раздельного сбора твердых коммунальных отходов, при которой каждый отдельный тип полимера помещался бы в свой отдельный контейнер или пакет, для того, чтобы разделение всех семи типов осуществлялось непосредственно в месте их образования. В связи с тем, что полимерные твердые коммунальные отходы часто собирают не очень тщательно даже при раздельном сборе, после сортировки на комплекс переработки отходов поступает лишь небольшой процент отходов, пригодных для дальнейшей переработки. В центре внимания оказываются главным образом жесткие полимерные упаковки. Это происходит в связи с тем, что гибкая полимерная упаковка, как правило, проблематична в использовании на комплексе переработки отходов. Низкое отношение веса к объему полимерных пакетов и пленок, а также их способность запутываться и маскировать другие предметы, делают их экономически менее привлекательными и технически трудными для извлечения и дальнейшей переработки.

Для увеличения процента переработки пленок и гибких упаковок в некоторых странах на уровне домашних хозяйств предлагается сортировать отдельно от всех прочих именно этот вид материалов. Извлечение гибких пленок из других потоков твердых коммунальных отходов также упрощает дальнейший процесс сортировки иных фракций. Возможно также введение дополнительных сортировочных и перерабатывающих мощностей на комплексе переработки отходов и предприятиях, перерабатывающих смешанные полимерные отходы.

Тщательная сортировка полимерных твердых коммунальных отходов по типам необходима для высокого уровня чистоты будущих вторичных материальных ресурсов, особенно в том случае, если речь идет о смешанном потоке [21]. Исследования показывают, что если жесткая упаковка, такая как бутылки, банки, поддоны и иные контейнеры, не содержит ПВХ или ПС, которые проблематичны для сортировки, то всю жесткую полимерную упаковку можно собирать и сортировать с минимальным перекрестным загрязнением.

Для решения данной задачи в последние годы во всем мире ведется активная разработка технологий, позволивших повысить эффективность разделения упаковки. Например, компании “Procter&Gamble” и “TOMRA”, которые активно участвуют в решении задач переработки 15 млн тонн отходов полимерных упаковок, образующихся

ежегодно в ЕС, представили в октябре 2018 г. на саммите в Гетеборге свою инновационную разработку, названную “Священный Грааль” и призванную облегчить процесс автоматической сортировки полимерных твердых коммунальных отходов [27].

В основе данной технологии лежит использование специальных “трейсеров” и водяных знаков при производстве упаковки. Сортировка полимеров, произведенных с использованием “трейсеров”, происходит за счет обнаружения с помощью УФ-излучения специальных УФ-маркеров (флуоресцентных пигментов), встроенных непосредственно в матрицу полимерного материала.

Водяные знаки в свою очередь – это коды, интегрированные в дизайн упаковки и обнаруживаемые камерами на высокоскоростных линиях сортировки. Дополнительный нюанс водяных знаков заключается в том, что потребители могут “читать” их со своих смартфонов, чтобы проверить информацию о переработке. Водяные знаки могут быть напечатаны, например, на этикетках изделий или интегрированы в изделие в 2D- или 3D-форме. Водяной знак содержит, как правило, много информации о продукте и его упаковке и может помочь в сортировке материалов на основе определенных спецификаций.

“Procter&Gamble” – не единственная компания, занимающаяся разработкой технологий нанесения водяных знаков на полимерные упаковки. Трехмерная технология нанесения водяных знаков на полимерных изделиях, таких как ПЭТФ-бутылки, разработанная нидерландской компанией “Fili Grade”, обеспечивает сортировщикам отходов уникальную возможность выбора технического оборудования. Код, практически невидимый для человеческого глаза, может быть прочитан камерой в ИК-, видимом или УФ-диапазонах. Читаемость водяного знака не зависит от загрязнения, искажений или неправильной ориентации предмета. Кроме того, технология нанесения водяного знака не предполагает использования каких-либо посторонних химических соединений, следовательно, потенциальные вторичные материальные ресурсы не содержат нежелательных примесей.

Компания “TOMRA”, помогающая оценить техническую осуществимость новых технологий сортировки, участвует также в проекте PRISM совместно с такими партнерами, как “Nextek”, Brunel University, CCL, “Mirage Inks”, “Cleantech Europe” и WRAP. Идея PRISM заключается в кодировании этикеток с использованием люминес-

центных соединений на основе редкоземельных элементов, а также материалов, полученных после переработки люминесцентных ламп. Предполагается, что в дополнение к переработке упаковки для пищевых продуктов из ПП, а также тары для молочных продуктов из ПЭВП с рукавными этикетками из ПЭТФ, эта технология откроет новые рынки для использования флуоресцентных соединений.

Кроме того, технологии производства полимерной продукции с использованием трейсеров и водяных знаков в настоящее время не имеют необходимого широкого распространения. Это значит, что невозможно пока судить о том, насколько они решат в будущем проблему переработки полимерных твердых коммунальных отходов, поскольку подавляющее большинство производимых в настоящее время продуктов потребления, содержащих полимерные детали, не имеет порой вообще никаких опознавательных знаков.

Таким образом, проблема разделения и переработки полимерных материалов все еще остается далеко не решенной. Чтобы достичь устойчивости производства, переработчикам приходится сталкиваться с рядом конкретных проблем, свойственным только процессу обращения с полимерными твердыми коммунальными отходами в зависимости от состава потока. Среди них следующие проблемы: отделение пленок от жестких полимеров и их дальнейшая сортировка; обнаружение ПЭТФ-бутылок, покрытых рукавными этикетками из ПВХ; удаление бутылок из ПВХ из потока ПЭТФ; разделение ПЭТФ-бутылок по цвету; удаление многослойных высокобарьерных полимерных предметов (например, на основе ПЭ/ПА/этиленвиниловый спирт и т.д.); удаление полиэтилентерефталат-гликоля из потока ПЭТФ; отделение черных или темных полимеров, которые нельзя отсортировать с помощью ближнего ИК-излучения; удаление нежелательных или запрещенных веществ, таких как бромированные антипирены и полибромированные дифениловые эфиры; отделение ПП, заполненного тальком; отделение ПА; выделение важных полимерных композитных материалов и т.д.

При решении перечисленных задач комбинированная сортировка, преимущественно с технологиями автоматического разделения, оказалась удобной и успешной в большинстве случаев. Существующие автоматизированные сортировочные машины, основанные на использовании оптических датчиков и сепараторы, определяющие плотность материалов, используются переработчиками наиболее часто.

Помимо обеспечения отсортированных фракций с высоким уровнем качества и чистоты, эти технологии также имеют решающее значение для удаления материалов, содержащих нежелательные вещества, таким образом, уменьшая неопределенность состава вторичных материальных ресурсов. Тем не менее, сегодня все еще необходимо найти наилучшие решения для выделения из состава полимерных твердых коммунальных отходов предметов, содержащих полибромированные дифениловые эфиры и другие стойкие органические загрязнители, а также темно-окрашенных отходов. К сожалению, в настоящее время большинство разрабатываемых технологий сортировки все еще не в состоянии полностью удовлетворить поставленные задачи в глобальных промышленных масштабах [28].

### ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Производству новых полимерных изделий из твердых коммунальных отходов могут предшествовать два вида процессов: физические (включая плавление) и химические. Физическая переработка широко используется в ЕС, в то время как химические методы получают свое распространение в других регионах мира. Например, в Японии около 5% отходов полимеров [23] утилизируются с использованием химических методов.

Некоторые химические методы переработки полимеров были разработаны группой японских исследователей при поддержке Института обращения с полимерными отходами, Японского совета по экологическим вопросам использования ПВХ, Винилового экологического совета и Японской сталелитейной корпорации по просьбе Организации развития новой энергетики и промышленных технологий [29]. В ЕС переработка полимеров химическими способами тоже ведется, но в гораздо меньших объемах.

Большая часть подвергаемых переработке во вторичные материальные ресурсы полимерных отходов в мире направляется на физическую переработку. При этом приблизительно 87% полимерных отходов перерабатываются в полуфабрикаты (хлопья, измельченные материалы, агломераты, гранулы), а остальные 13% превращаются непосредственно в продукты, требования к качеству которых довольно низкие (цветочные горшки, искусственные растения, садовая мебель, дверные и автомобильные коврики и т.п.). Полимерные твердые коммунальные отходы, пригодные для этой цели, поступают, как правило, из смешанных за-

грязненных потоков. Полимеры более высокого качества могут применяться в различных производствах. Высоким спросом пользуются промышленные полимерные отходы, отличающиеся однородностью состава и доступностью в больших количествах. Такие отходы могут сразу же вовлекаться в производственный цикл и позволять получать промежуточные и конечные продукты высокого качества.

В отличие от них обычные твердые коммунальные отходы содержат в своем составе раз-

личные типы полимеров с широким спектром добавок (пластификаторов, стабилизаторов, антипиренов и других веществ), которые могут усложнить переработку и снизить качество новых товаров. В то же время введенные в различных странах законы об утилизации тары и упаковки привели к развитию данной отрасли.

Общая примерная схема технологического процесса переработки полимерных твердых коммунальных отходов представлена ниже.



Проблемой полимерных твердых коммунальных отходов является их ограниченный потенциал для переработки во вторичные материальные ресурсы. Из соображений гигиены и безопасности упаковка, контактирующая с пищевыми продуктами, на которую в действительности приходится большая часть используемых в быту полимерных предметов, должна быть идеально чистой и сама по себе не должна быть произведена из вторичных материальных ресурсов. В связи с этим использованные полимерные предметы, выбрасываемые из дома, могут стать, к примеру, текстильными изделиями, канцелярскими товарами и упаковочными материалами хозяйственного назначения, но только не упаковкой, предназначенной для контакта с пищей.

Недавно, однако, была разработана технология “ПЭТФ-бутылка в ПЭТФ-бутылку”, в которой слой переработанного полимера помещается

между двумя слоями полимера из первичных материальных ресурсов таким образом, чтобы полученный из вторичных материальных ресурсов полимер не находился в непосредственном контакте с напитком. Внедрение в систему обращения с отходами подобных технологий может стимулировать спрос на полимерные вторичные материальные ресурсы, что благотворно скажется на устойчивости всей системы.

Показано [30], что сокращение производства первичных материальных ресурсов за счет переработки полимерных твердых коммунальных отходов во вторичные материальные ресурсы позволяет существенно сократить использование природных ресурсов и выбросы парниковых газов. В то же время не менее важно подумать и о воздействии самих процессов переработки полимерных твердых коммунальных отходов на окружающую среду.

Считается, что переработка является системой сокращения отходов, а также сохранения таких природных ресурсов, как вода, воздух, почва и энергия, но это не всегда так. С точки зрения иерархии управления отходами [19, 31] и результатов различных оценок жизненных циклов полимерных твердых коммунальных отходов, их переработка во вторичные материальные ресурсы была признана более экологически дружественным методом управления, чем термическая переработка в энергию или захоронение. С другой стороны, этот весьма широкий вывод может не в полной мере распространяться на все имеющиеся типы полимерных материалов. Например, если переработанный полимер приводит к снижению эффективности и скорости замены первичных полимеров, а также не отвечает предъявляемым качествам (например, содержит более высокое количество загрязняющих веществ или менее износостоек и функционален), процесс считается неустойчивым и убыточным [32]. В то же время существует ряд полимерных материалов, корректная переработка которых во вторичные материальные ресурсы в настоящее время невозможно на все или является куда более затратной, чем их первичное производство.

Очевидно, что переработка полимеров в настоящий момент нелегка и несмотря на то, что необходимо сокращать затраты на производство первичных материальных ресурсов, все же необходимо дважды подумать, прежде чем использовать еще большие объемы природных ресурсов для переработки отходов во вторичные материальные ресурсы.

В отличие от алюминиевых банок и стеклянных бутылок с поверхности полимерной тары очень трудно удалить загрязнения, особенно внутренние, сохранив при этом однородность состава полимера с целью его переработки в такую же тару [33]. Данный факт наглядно демонстрируют объемы переработанных алюминиевых, стеклянных и полимерных емкостей, осуществляемые, к примеру, на территории Японии, которая является одним из лидеров по сбору полимерных отходов и их переработке во вторичные материальные ресурсы.

Согласно данным Японской ассоциации по переработке алюминиевых банок, общий показатель переработки алюминиевых банок в 2012 г. в стране составил 94.7%, а уровень изготовления из них новой тары – 66.7%. По данным Совета по переработке ПЭТФ-бутылок, показатель сбора полимерных бутылок в 2011 г. составил 79.6%, а показатель их переработки – 11.4%.

При этом количество энергии, необходимое для производства 1 кг первичного алюминия из боксита, составляет 146.4 МДж, в то время как для переработки отходов алюминия в 1 кг металлического алюминия необходимо 4.42 МДж. Таким образом, для переработки алюминия требуется только 3.01% от количества энергии, необходимой для производства первичного металла.

В свою очередь количество энергии, необходимой для производства 1 кг полимера из нефти, составляет 63 МДж, тогда как для переработки полимерных отходов в 1 кг полимерных бутылок требуется 31 МДж. Это означает, что для переработки полимерных бутылок нужно 49% энергии, затрачиваемой на производство полимера из нефти. Данный пример, однако, касается только одного конкретного типа полимера и одного вида изготовленных из него изделий.

Стратегия устойчивого развития ЕС и директива по управлению отходами содержат положения об альтернативах в тех случаях, когда образование полимерных отходов невозможно предотвратить, многократное использование предметов исключено, а переработка не является устойчивой. К примеру, не подлежащие переработке полимеры могут обеспечить ценный тепловой ресурс в системах получения энергии, внося, таким образом, значительный вклад в энергетическую безопасность и сокращая необходимость использования для этих целей ископаемых топлив [34].

#### ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ЭНЕРГИЮ

Проблемой переработки полимерных твердых коммунальных отходов в энергию посредством термического воздействия до недавнего времени являлся выброс токсичных примесей, но по мере развития технологий и повышения их безопасности такой вид переработки стал внедряться в системы управления отходами различных стран на национальном уровне как один из ведущих способов обращения с твердыми коммунальными отходами. К примеру, в Японии в 2005 г. был пересмотрен Закон об утилизации отходов, в котором было сказано, что “во-первых, образование полимерных отходов должно быть сокращено, а образующиеся полимерные отходы не должны попадать на свалку, так как они пригодны для получения тепла”. После этого в 2006 г. была принята поправка к Закону об утилизации тары и упаковки, включающая, при определенных ограничениях, возможность их использования в



**Таблица 1.** Сравнительные характеристики RDF и RPF (Japan RPF Association, 2011)

Вид топлива	Вид отходов	Теплота сгорания, кДж/кг	Содержание воды
RDF	Твердые полимерные отходы	12600–16800	Высокое (около 8%)
RPF	Промышленные полимерные и бумажные отходы	25000–42000	Низкое

качестве полноценного топлива – “Refuse Derived Fuel” (RDF) и других форм полимерных твердых коммунальных отходов, пригодных для термической обработки, как признанного метода переработки в дополнение к иным способам. С тех пор переработка полимеров с помощью термических методов существенно возросла, учитывая особенно тот факт, что ПЭ, ПП и ПС имеют высокий энергетический потенциал, делая их ценным топливом. Кроме того, среди производителей целлюлозы появился спрос на бумажное и полимерное топливо – “Refuse Paper & Plastic Fuel” (RPF) в качестве альтернативы обычному. Далее мы рассмотрим вопрос целесообразности такого метода переработки полимерных твердых коммунальных отходов подробнее.

#### ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ В ТОПЛИВО

Как было упомянуто выше, в последние годы в Японии и некоторых других странах популярность приобретает способ переработки различных отходов в два вида топлива. К первому виду относится RDF – топливо, получаемое из твердых коммунальных отходов, в состав которых входят и полимеры; а ко второму RPF – топливо, получаемое из бумажных и полимерных отходов, как правило, промышленного происхождения. В табл. 1 приведены их основные сравнительные характеристики [35].

Для производства RDF используют, как правило, смесь твердых коммунальных отходов, состоящую преимущественно из горючих компонентов (кухонные отходы, бумага и полимеры), которые измельчают, сушат горячим воздухом и под давлением формируют в pellets серого цвета. Теплотворная способность RDF увеличивается при повышении доли полимеров в смеси. Превращение твердых коммунальных отходов в RDF уменьшает их объем на одну пятую, а вес вдвое, что снижает транспортные расходы. С другой стороны, производство RDF с его последующим сжиганием почти в два раза дороже, чем термическая обработка не переработанных в pellets твердых коммунальных отходов в энергию. В связи с этим производство RDF не является наиболее эффективным с эко-

номической точки зрения вариантом переработки полимерных и других твердых коммунальных отходов.

Еще одна существенная проблема использования данного вида топлива – его легкая возгораемость, которая при отсутствии должного хранения и несоблюдении техники безопасности работы с ним может приводить к взрывам и пожарам. Такие пожары практически невозможно потушить, поскольку возникают они, как правило, в самих топливных хранилищах.

Исследования, направленные на изучение возможностей решения данной проблемы, показали [36], что возгорания происходят в основном в процессе использования RDF, так как в его состав входит биомасса, разложение которой сопровождается выделением тепла (от комнатной температуры до 80°C). Теплообразование, возникающее в ходе ферментативного брожения и иных причин при хранении RDF, приводит к выделению в окружающее пространство помещений горючих газов, в частности, метана.

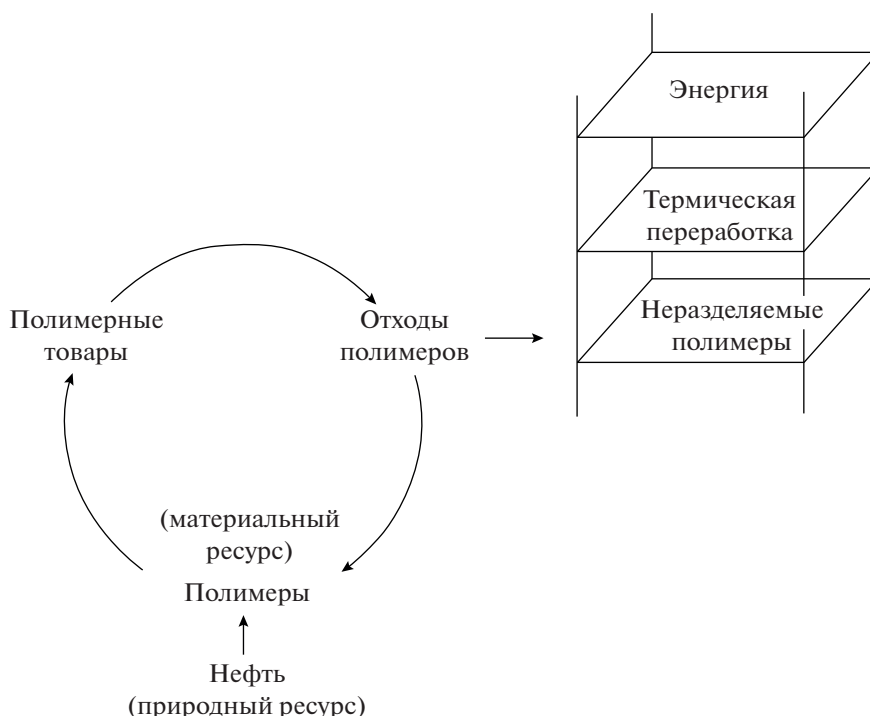
RPF в отличие от RDF не генерирует тепло в процессе хранения, поскольку технология его производства не предполагает использования биомассы. Тепло, однако, может начать выделяться в процессе трения топлива при его транспортировке на заводе, в связи с чем оно также может воспламениться и взрываться.

Таким образом, единственным плюсом RDF является его высокая транспортабельность, так как ни энергетических, ни экологических, ни экономических преимуществ такое топливо не имеет, а потому трата энергии на его производство является неоправданной [33].

#### ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПОЛИМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Энергетические затраты и уровень нагрузки на окружающую среду, производимый каждым из перечисленных в данном обзоре методов переработки, определяется с помощью оценки жизненного цикла полимерных твердых коммунальных отходов.

В общем виде жизненный цикл полимерных твердых коммунальных отходов представлен ниже.



Из схемы следует [19, 20], что, во-первых, в качестве природного ресурса в данном процессе используется нефть, которую на нефтехимических заводах путем высокоэффективных технологий превращают во все необходимые первичные материальные ресурсы (полимеры), из которых изготавливают различные предметы из полимеров.

Во-вторых, после того как данные предметы возвращаются в отходы, которые жители не могут дома или в офисах подвергнуть тщательной сортировке, особую роль играют комплексы по переработке отходов, на которых роботизированные устройства и профессиональные рабочие вы-

деляют из общей смеси, по крайней мере, четыре вида полимерных твердых коммунальных отходов: ПЭТФ, ПЭНП, ПЭВП и ПП; их впоследствии отправляют на переработку во вторичные материальные ресурсы, тем самым замыкая циклы.

В-третьих, сортированные полимерные отходы, которые пока не удается дифференцировать, чтобы получать вторичные материальные ресурсы в виде индивидуальных полимеров, вывозят на специализированные предприятия по термической переработке в тепловую и электрическую энергию, как показано с помощью “этажерки” на приведенной выше схеме. Подробный анализ ситуации указывает на то, что это абсолютно необходимо делать, чтобы не оставлять неразделяемые полимерные отходы на свалках, поскольку в них кроме углеводородных полимеров (ПС, ПК, поликарбонаты и т.д.), которые при горении (тлении) свалок дают канцерогенные полиядерные ароматические углеводороды, есть и ПВХ, дающий в этих условиях супертоксичные диоксины [19, 20].

В табл. 2 представлены средние объемы энергии, затрачиваемые на переработку 1 т ПЭТФ-отходов, с помощью различных методов их переработки. Видно, что переработка по принципу “бутылка в бутылку” является на данный момент энергетически наиболее затратным способом переработки.

**Таблица 2.** Сравнение энергетических затрат, необходимых для переработки отходов ПЭТФ различными методами (по Yamashita M., Matsumoto S., 2014)

Метод переработки/вид манипуляции	Количество энергии, кДж/т
Сбор отходов	196635
Термическая переработка	327034
Производство RDF	1594041
Производство ПЭТФ-хлопьев	5766115
Производство вторичных материальных ресурсов, пригодных для изготовления бутылок методом химической деградации	30593359

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо ответить на следующие важные вопросы: какой метод переработки полимерных твердых коммунальных отходов можно считать в конечном итоге наиболее экологически, экономически и социально приемлемым и можно ли определять процесс термической переработки, например ПЭТФ-бутылок, с целью получения энергии как технологию переработки.

Исходя из всего изложенного выше, становится ясно: несмотря на то, что затраты энергии на переработку твердых полимерных отходов во вторичные материальные ресурсы, как считается, ниже, чем затраты на производство полимерных бутылок из первичных материальных ресурсов — энергетические затраты на химическую переработку тех же ПЭТФ-бутылок фактически выше, поскольку включают в себя комплекс сложных физических процессов предварительной подготовки отходов.

Таким образом, при принятии решений об управлении полимерными твердыми коммунальными отходами необходимо учитывать индивидуальные особенности переработки конкретных полимеров. Термическая переработка качественно отделенных от всех прочих видов твердых полимерных отходов (в частности, ПЭТФ-бутылок), конечно, не является целесообразной, однако рационально термически перерабатывать в энергию те полимерные отходы, которые сильно загрязнены другими фракциями, а их сортировка экономически и экологически неадекватная.

С точки же зрения потребления энергии полимерные бутылки и упаковку в принципе неразумно использовать в качестве емкостей для хранения пищевых продуктов. Именно поэтому одна из задач человечества в ближайшем будущем — сокращение процента потребления полимерной тары (и полный отказ от нее в конечном итоге), а также поиск альтернативных способов хранения пищевых продуктов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MICRO 2016: Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems / Ed. by J. Baztan Elsevier, 2016.
2. Borrelle S.B. et al. // Science. 2020. V. 369. № 6510. P. 1515.
3. Carpenter E.J., Smith K.L. // Science. 1972. V. 175. № 4027. P. 1240.
4. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. // Sci. Adv. 2017. V. 3. № 7. e1700782.
5. Jambeck J.R., Geyer R. // Science, 2015. V. 347. № 6223. P. 768.
6. Kelly A., Lannuzela D., Rodemann T., Meiners K.M., Auman H.J. // Marine Pollution Bull. 2020. V. 154. 111130.
7. Law K.L. // Ann. Rev. Marine Sci. 2017. V. 9. P. 205.
8. Law K.L. et al. // Environ. Sci. Technol. 2014. V. 48. № 9. P. 4732.
9. Law K.L. et al. // Science. 2010. V. 329. № 5996. P. 1185.
10. Ling S.D., Sinclair M., Levi C.J., Reeves S.E., Edgar G.J. // Marine Pollution Bull. 2017. V. 121. № 1–2. P. 104.
11. Van Sebille E. et al. // Environ. Res. Lett. 2015. V. 10. № 12. P. 124006.
12. Wilcox C., Hardesty B.D., Law K.L. // Environ. Sci. Technol. 2020. V. 54. № 2. P. 790.
13. Angelique White: Garbage Soup, not Garbage Patch, in our Oceans // EarthSky. 2011. URL: <https://earthsky.org/earth/angelique-white-a-garbage-soup-not-a-garbage-patch-in-earths-oceans>
14. Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P. et al. // Science. 2004. V. 304. № 5672. P. 838.
15. Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C., Barlaz M. // Phil. Trans. R. Soc. B. 2009. V. 364. № 1526. P. 1985.
16. Rios L.M., Moore C., Jones P.R. // Marine Pollution Bull. 2007. V. 54. № 8. P. 1230.
17. Tanabe S., Watanabe M., Binh Minh T., Kunisue T., Nakanishi S., Ono H., Tanaka H. // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. № 2. P. 403.
18. Microplastics — a growing environmental risk. New business opportunities in combating microplastics, Views on Environmental Policy / Ed. by O. Setälä SYKE, 2017.
19. Petrosyan V., Shipelov A. // Ecology Industry Russia. 2020. V. 24. № 5. P. 58.
20. Petrosyan V., Shipelov A. // Bull. Russ. Acad. Nat. Sci. 2020. V. 20. № 4. P. 3.
21. Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. // Phil. Trans. R. Soc. B. 2009. V. 364. № 1526. P. 2115.
22. ASTM D7611 Standard Practice for Coding Plastic Manufactured articles for Resin Identification // ASTM, 2014.
23. Villanueva A., Eder P. // JRC Technical Report Proposal. European Commission Joint Research Centre, 2014.
24. Plastics — the Facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data // PlasticsEurope, 2018.
25. Plastics — the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data // PlasticsEurope, 2018.
26. Plastics — the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data // PlasticsEurope, 2020.
27. Sykes T. // Packaging Europe, 2018. URL: <https://packagingeurope.com/sorting-plastic-recycling-tracers-digital-watermarks-tomra-procter-gamble/>
28. REMIX. INTERIM REPORT 1: Benchmarking of existing and emerging Technologies for sorting and recycling of Mixed Plastics Waste (WI 2) / Ed. by V. Frerejean, et al. Call for tenders N 154/PP/ENT/PPA/12/6476. 2014.
29. Waste Management and Recycling in Japan Opportunities for European Companies (SMEs focus) / Ed. by C. Yolin EU-Japan Centre for Industrial Cooperation. Tokyo, 2015.

30. Mitigating Climate Change and Waste Recycling: Household Packaging Case Study / Ed. by V. Depoues, C. Bordier Climate Report. Research on the economics of climate change, 2015.
31. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste // Official Journal of the European Union OJ L 312/3, 2008.
32. Domestic mixed plastic packaging waste management options. An assessment of the technical, environmental and economic viability of recycling domestic mixed plastics packaging waste in the UK / Ed. by S. Foster. WRAP Final report. 2008.
33. Yamashita M., Matsumoto S. // Int. J. Environmental Protection Policy. 2014. V. 2. № 4. P. 132
34. Public Private Cooperation for Avoiding Plastic as a Waste. Action 3.1: Survey on existing technologies and methods for plastic waste sorting and collection // Plastic ZERO, 2013.
35. Homepage of Japan RPF Association.  
URL: <http://www.jrpf.gr.jp>
36. Koseki H. // Energies. 2011. V. 4. № 12. P. 616.