

## ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2022 г. А. А. Ярославов<sup>a,\*</sup>, М. С. Аржаков<sup>a,\*\*</sup>, А. Р. Хохлов<sup>a,b,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>b</sup>Институт элементоорганических соединений имени А.Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru

\*\*E-mail: msa60@yandex.ru

\*\*\*E-mail: khokhlov@presidium.ras.ru

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.

После доработки 19.07.2021 г.

Принята к публикации 26.07.2021 г.

Полимерные материалы рассчитаны на ограниченный срок эксплуатации, в связи с чем всё более актуальной становится проблема минимизации полимерных отходов, а также их последующей утилизации. Минимизация полимерных отходов может быть осуществлена либо за счёт их вторичной переработки (что требует их раздельного сбора и сортировки), либо за счёт развития безотходных технологий замкнутого цикла. Конечная утилизация полимерного материала происходит при захоронении в почву на свалке, а также при сжигании на мусоросжигательном заводе. В статье рассматриваются основные научные проблемы, которые связаны с оптимальным планированием всех стадий жизненного цикла полимерного материала — его производства, эксплуатации и утилизации.

**Ключевые слова:** полимерные материалы, пластик, производство, безотходные технологии, вторичная переработка, утилизация.

DOI: 10.31857/S086958732201011X

100 лет назад в Германии была опубликована статья, в которой впервые была изложена теория о цепном строении “больших” молекул [1]. Автор этой теории Герман Штаудингер показал, что в таких молекулах, названных им макромолекулами, отдельные элементы (звенья) соединены друг с другом в длинные цепи, существование которых определяет необычные и, как оказалось, практи-

чески важные свойства новых “полимерных” материалов. Результатом этого открытия стало понимание того, как можно получить прочные, лёгкие и недорогие материалы с контролируемыми свойствами, которые нашли применение в разных областях — от упаковки и одежды до авто- и авиастроения.



ЯРОСЛАВОВ Александр Анатольевич — член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. АРЖАКОВ Максим Сергеевич — доктор химических наук, профессор кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ХОХЛОВ Алексей Ремович — академик РАН, вице-президент РАН, заведующий кафедрой физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующий лабораторией физической химии полимеров ИНЭОС РАН.

## ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Рис. 1. Жизненный цикл полимерного материала

За 100 лет развития науки о полимерах и полимерной промышленности мир окружающих человека материалов изменился до неузнаваемости. Одновременно полимерный прогресс привёл к появлению новых проблем, главная из которых связана с ограниченным сроком использования полимерных материалов. Традиционные материалы, с которыми имеет дело человек, — керамика, стекло, металл, древесина — используются в течение длительного времени. В отличие от них полимерные материалы часто рассчитаны на более короткий срок эксплуатации, а полимерная упаковка — на одноразовое употребление [2, 3].

Устойчивость полимеров к действию атмосферных факторов (тепло, свет, влажность и проч.) и микроорганизмов привела к накоплению использованных и ставших ненужными полимерных материалов и изделий [4, 5]. Скопления полимерного мусора обнаруживаются практически повсеместно. Стихийные свалки формируются в пригородных и рекреационных зонах, лесах, прибрежной полосе, на морском побережье и т.д. Оттуда мусор смывается дождями и талыми водами в реки и затем в моря и океаны, формируя гигантские мусорные острова [6]. Неприятным следствием этого длительного путешествия пластика является постепенное измельчение полимерного материала до дисперсных частиц (микропластика) [7], которые наносят катастрофический вред поедающим их живым организмам (животным, птицам и рыбам) и которые по пищевым цепям попадают в организм человека. Свой вклад в разрастание мусорных островов и появление микропластика вносит рыболовный промысел с его традиционной практикой оставлять в океане потерянные рыболовные сети.

В 2019 г. в мире было произведено около 368 млн тонн пластика [8], всего же с 1950 по 2017 г. — около 6.3 млрд тонн [9], из них переработано около 9% и сожжено 12%. Остальной мусор либо пополнил объёмы стихийных свалок, либо находится на контролируемых полигонах, либо увеличил размеры мусорных островов. Эти факты заставляют обратить самое серьёзное внимание на проблему очистки планеты от накопившегося мусора (в том числе полимерного) и на разработку способов минимизации распространения мусора [10].

Существующий рынок полимерной продукции представлен ограниченным набором исходных полимеров; для улучшения экономических и потребительских характеристик конечного продукта часто используют комбинации полимеров. В Евросоюзе только четыре вида полимеров — полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид и полиэтилентерефталат — формируют три четверти полимерного рынка [11]; суммарно продукция европейских компаний достигает 17% мирового рынка полимеров. Крупнейший производитель полимерной продукции — Китай, который занимает 30% мирового рынка; две трети выпускаемых и потребляемых полимеров относятся к числу крупнотоннажных (полиэтилен, полипропилен и др). Российский рынок изделий из пластика составляет немногим более 2% мирового объёма; около 15% всех промышленных изделий в России изготовлены из пластмассы.

Основные стадии жизненного цикла полимеров включают (рис. 1):

- *производство*, то есть синтез и переработку полимерного сырья в материал и изделие;

- *эксплуатацию*, в ходе которой происходит старение и износ материала/изделия с потерей первичного комплекса свойств;

- *утилизацию*, под которой понимают вторичную переработку полимерных отходов и/или уничтожение полимерного материала/изделия.

**Производство.** С одной стороны, перед производственниками ставится задача повысить качество исходного сырья (сортированных полимерных отходов) для переработки во вторичные полимеры. Это требует развития оптимизированного дизайна, который должен обеспечить технологическую реализуемость и экономическую привлекательность рециклинга. В первую очередь это касается упаковки, на долю которой приходится по разным оценкам от 30 до 50% выпускаемых полимеров [12]. С другой стороны, полимерные изделия часто содержат различные трудноудаляемые добавки (красители, стабилизаторы, пластификаторы, модификаторы и проч.), которые ухудшают качество вторичного сырья, что осложняет его переработку и повышает её стоимость. Стратегия оптимизированного дизайна предполагает (а) снижение до возможного минимума добавок, прежде всего токсичных, (б) использование полимеров одного вида или смесей, которые могут быть разделены на отдельные компоненты, (в) лёгкую идентификацию полимеров в смесях и композитах.

Параллельно следует оказывать поддержку исследованиям в сфере поиска, во-первых, новых полимеров и полимерных материалов, во-вторых, новых направлений использования известных полимеров, которые позволят расширить области их применения без существенного изменения технологии синтеза/формования. Особый интерес вызывают *безотходные технологии* замкнутого цикла, реализуемые без органических растворителей и дающие на выходе 100%-ный полимер или готовое сформованное изделие, и технологии, позволяющие получать продукты через дозированное *смешивание водных полимерных растворов*. Пример безотходной технологии — использование лабильных, реакционноспособных и стимул-чувствительных прекурсоров (смесей полимер—мономер—инициатор) [13]. Мономер в прекурсор (а) облегчает переработку композиции, что в традиционном варианте достигается введением пластификаторов, лабрикантов и т.п., (б) обеспечивает направленное формирование структуры материала и (в) фиксирует сформованную структуру и конфигурацию изделия за счёт дополимеризации и полного исчерпания мономера.

Ещё один пример безотходной технологии — 3D-печать, или аддитивное производство [14, 15]. Под этим термином понимают создание трёхмерных объектов путём последовательного нанесе-

ния слоёв жидкого, порошкообразного или листового материала, в качестве которого часто используют термо- и фоточувствительные полимеры (полимерные смеси). Фиксация формы готового изделия достигается отверждением расплавленного полимера или в ходе полимеризации жидкой смеси с участием фотоактивных компонентов. В отличие от традиционных методов механического производства и обработки (фрезеровка, резка, сверление и проч.) 3D-печать исключает стадии удаления лишнего материала. К растворной технологии относится получение поликомплексных рецептур из водорастворимых комплементарных полимеров, например, из противоположно заряженных полимеров (полиэлектролитов) [16]. Растворитель (вода) легко удаляется из полимерного раствора при испарении, когда поликомплексная рецептура используется в качестве связующего сыпучих тел (в том числе почв и грунтов) [17] и материала для аддитивных технологий [18] или совместима с биологической средой, в которой функционирует поликомплексный носитель лекарственных веществ [19]. Описанные подходы позволяют заметно расширить спектр продукции с использованием ограниченного круга исходных полимеров и/или мономеров, при этом сократив количество или даже полностью исключив вспомогательные вещества. Этот путь — минимальный набор исходных веществ, их экологическая совместимость и безотходность производственного процесса — представляется самым перспективным при обсуждении возможностей совершенствования технологии синтеза полимеров будущего.

**Эксплуатация.** В процессе эксплуатации полимеры (полимерные материалы) подвергаются различным воздействиям (деструкции, химической модификации, загрязнению, механическому износу и проч.), которые могут существенно изменить свойства полимеров/материалов. Такая «модификация» может сделать вторичное полимерное сырьё непригодным для производства некоторых изделий (например, медицинского/гигиенического назначения или контактирующих с пищей) и закрыть целые области для использования переработанного вторичного сырья.

Особую опасность представляет деструкция полимеров до частиц размером менее 5 мм (микропластик), которые могут встраиваться в пищевые цепочки и наносить ущерб живой природе [20]. Такие частицы формируются при истирании автомобильных шин, дорожного покрытия и краски, стирке синтетической одежды и при производстве полимеров (так называемый первичный микропластик). Крупный пластиковый мусор (пакеты, одноразовая посуда, бутылки, упаковочная плёнка и др.) распадается до вторичного микропластика под действием природных сил. По оценкам Международного союза охраны



Рис. 2. Большое тихоокеанское мусорное пятно: вид сверху (слева) и снизу (справа)

природы (International Union for Conservation of Nature, IUCN), вторичных микропластиков в 5–6 раз больше, чем первичных.

Первичный микропластик и крупные пластиковые объекты дождями смываются в реки, которые выносят мусор в океаны. В отчёте Еврокомиссии (2019) [21] указывается, что ежегодно в океан попадает от 4.8 до 12.7 млн тонн пластиковых отходов; 50% этой массы приходится всего на пять стран: Китай, Индонезию, Филиппины, Вьетнам и Шри-Ланку.

Попавший в океан мусор собирается в крупные острова, в которых удерживается поверхностными океаническими течениями. На самом деле остров больше похож на “пластиковый суп” с весовой долей мелких частиц (микропластика) около 8% и количеством таких частиц, превышающим 90% [6] (рис. 2). Самое крупное из таких образований известно как Большое тихоокеанское мусорное пятно, или Восточный мусорный континент (северная часть Тихого океана). Термин был предложен океанографом Кертисом Эббесмейером. Пятно представляет собой мобильную систему, в которой некоторые части могут отделяться, снова соединяться или уходить на глубину (до сотен метров); в придонные слои опускается до 70% попадающего в океан пластика. Размеры и внешний вид пятна постоянно меняются. Точный размер мусорного континента неизвестен, по приблизительной оценке это от 700 тыс. до 1.5 млн км<sup>2</sup> [22]. При таких масштабах пятно может содержать более 100 млн тонн мусора, состоящего в основном из мелких частиц первичного и вторичного (то есть мелкого) пластика; по некоторым оценкам, содержание мусора здесь в несколько раз больше — до 350 млн тонн отходов.

Считается, что основная часть мусора попадает в океан из наземных источников, остальное — последствия работы нефтяных буровых установок и судоходства (рыболовные сети, мусор с судов, грузовые контейнеры и др.). Этот результат

ставит вопрос об экологической ответственности человека за последствия неразумного (потребительского) отношения к использованию полимерных материалов и изделий. Необходимо повышать информированность людей о последствиях полимерного загрязнения, сделать постоянной и системной очистку рекреационных/прибрежных зон и пляжей от мусора, отказаться от использования одноразового пластика, заменить синтетический пластик на биodeградируемый (в том числе природного происхождения).

**Утилизация.** Для утилизации полимеров предлагаются три основных подхода: вторичная переработка полимеров в новые продукты, использование полимеров в виде топлива для получения энергии, а также биологическое разложение полимеров под воздействием естественных причин.

Вторичная переработка пластиков означает возможность многократного использования произведённых полимерных материалов. Для этого необходимо организовать раздельный сбор полимерного мусора и последующую сортировку пластиковых отходов по химическому составу полимера, целевому назначению, цветовой гамме и т.д. Для упрощения этих процедур предлагается снабжать полимерные материалы поясняющими надписями, специальными химическими маркерами (трейсерами) и водяными знаками. В дополнение к этому следует повышать ответственность производителя за жизненный цикл товара, требуя от него организации и проведения процедур сбора и сортировки мусора или выплаты компенсации в случае отказа.

Следует иметь в виду, что по своим характеристикам вторичный пластик уступает исходному из-за износа и старения в процессе эксплуатации, а также вследствие повторного температурно-силового воздействия в ходе вторичной переработки. Эти факторы значительно сужают области целевого использования переработанного пластика. Дополнительная проблема — вторичная переработка модифицированных полимеров. Модифи-

кация заметно усложняет переработку полимеров; кроме того, свойства получаемых продуктов могут сильно зависеть от состава и качества вторсырья. Необходимость проведения тщательной очистки мусорного композиционного или смешанного пластика увеличивает себестоимость материала и делает его рециклинг нерентабельным.

Для одноразовых изделий следует использовать полимеры, дающие вторичное сырьё с высоким потенциалом повторного использования. Именно по этой причине Евросоюз отказался от использования вспененного полистирола для производства одноразовой посуды [23]: малый вес и склонность к быстрому и неустраняемому загрязнению делают нерентабельной вторичную переработку изделий из этого полимера.

Отметим, что даже в самом благоприятном случае вторичная переработка не решает, а только отсрочивает проблему утилизации отходов. Причём этот вопрос практически не рассматривается в публикациях на тему рециклинга. Между тем очевидно, что многократная переработка полимерного мусора должна сопровождаться потерей всех его функциональных и эксплуатационных свойств. В итоге через несколько циклов переработки оставшаяся масса будет непригодна для превращения в новый продукт и может быть только уничтожена (сожжена или захоронена).

Возможный вариант вторичной переработки полимерных отходов связан с получением из них широко используемых химических веществ, таких как ацетон, уксусная кислота и т.д. [24]. Этот путь требует тщательной сортировки пластиковых отходов с целью получения однородного по составу продукта для дальнейшего термоллиза и разработки специфических катализаторов для повышения выхода целевых продуктов. Перспективной средой для проведения таких процессов является типичный растворитель “зелёной химии” – сверхкритический диоксид углерода [25]. Использование пиролитического способа разложения полимеров (в инертной атмосфере) позволяет получать до 90% продукта, который можно применять в качестве жидкого топлива (например, в котельных). Пиролитическое разложение позволяет получать бензин, однако такие разработки пока находятся на стадии лабораторных и пилотных испытаний.

Жизненный цикл пластика завершается уничтожением отходов полимерной индустрии путём их сжигания или захоронения в почву [26]. Сжигание полимерного мусора представляется экономически целесообразным процессом, так как полимеры являются высокоэффективным и высококалорийным топливом. Их теплотворная способность чрезвычайно высока. Сгорают они так же чисто, как большинство сортов нефти, и намного чище, чем уголь. Однако использование

полимеров в качестве топлива для получения энергии сталкивается с проблемой нейтрализации токсичных веществ, образующихся в ходе температурной переработки пластиков. В настоящее время проблема выброса продуктов горения в атмосферу решается за счёт применения эффективных катализаторов сгорания/конверсии, фильтров и очистных блоков. В последнее время мусоросжигательные заводы строятся на территориях, отведённых для сбора твёрдых бытовых отходов (мусорных свалках). Эти меры значительно повышают экологическую безопасность экономически выгодного сжигания полимерного мусора. Вопрос об утилизации зольных остатков, содержащих металлы (в том числе тяжёлые) и негорючие минеральные наполнители, остаётся открытым. Использование их в качестве строительного материала, пигментов и т.п. ограничено неконтролируемой и однообразной цветовой гаммой.

Полимеры и полимерные материалы, которые не могут быть превращены в новые продукты и переработаны термически, вывозятся на полигоны для твёрдых бытовых отходов, где происходит их захоронение. Такой полигон, на котором собираются различные, не только полимерные отходы, рассматривается либо в качестве пассивной свалки, которая постепенно проседает из-за уплотнения массы, вызываемой атмосферными воздействиями: дождями, таянием снега, ветром и тяжёлой техникой, привозящий новые партии мусора и разравнивающей свалку. Более эффективный и практически полезный случай – активная свалка, когда мусорный полигон выполняет роль источника так называемого свалочного газа (биогаза), который образуется в результате анаэробного разложения органических, в том числе полимерных, отходов [27]. В любом случае жизненный цикл свалки завершается через 20–25 лет, после чего она подвергается рекультивации с последующим переводом территории в категорию сельскохозяйственных, лесохозяйственных или рекреационных земель.

Работы по рекультивации свалок включают несколько принципиально важных операций: нанесение на поверхность свалки плодородного почвенного слоя и его закрепление с целью противодействия ветровой и водной эрозии; придание слою способности запасать и удерживать воду; нейтрализацию токсичных органических веществ и тяжёлых металлов, отрицательно воздействующих на рост и развитие растений; повышение плодородия почвенного слоя. Весь комплекс этих работ выполняется с использованием водных рецептур на основе поликомплексов [17]. Варьированием состава поликомплексов можно создавать рецептуры, настроенные на обработку почвы определённого вида: песок, супесь, чернозём и т.д.

Изменить ситуацию с загрязнением окружающей среды планировалось за счёт широкого использования полимеров/материалов, способных спонтанно разлагаться под действием простых природных факторов. Однако на смену первоначальному энтузиазму пришли более осторожные оценки. Оказалось, что биоразложение протекает достаточно медленно даже в активных средах, например, в почве [28]. Формирование конъюгатов из биоразлагаемого и небiorазлагаемого полимеров ускоряет деструкцию образца, но отрицательно сказывается на его свойствах, ухудшает способность вторичных полимеров к переработке, снижает качество получаемых изделий и при этом не решает проблему образования опасного микропластика. Помимо этого, термин “биodeградация” часто используют как маркетинговый ход, не имеющий отношения к продаваемому товару, но порождающий у потребителя иллюзию возможности быстрого и безболезненного поглощения полимера природной средой (в предельном случае при выбрасывании полимерного мусора на улицу). Эти критические замечания справедливы прежде всего относительно синтетических биоразлагаемых полимеров/конъюгатов. Природное сырьё (древесина, трава, экзоскелеты ракообразных и насекомых и т.д.) и выделяемые из них полимерные продукты (прежде всего полисахариды различного состава) подвергаются полному биологическому разложению [29] и потому могут быть использованы для получения экологически безопасных материалов и изделий (одноразовой посуды, упаковки, предметов гигиены).

Отдельного внимания заслуживает проблема мусорных островов/континентов. Катастрофический рост этих образований за последние два десятилетия заставляет искать экономически приемлемые способы переработки океанского мусора. Сейчас обсуждаются разные способы решения этой проблемы (захватывающие платформы, плавучие ограждения, сети для ловли мусора и др.). Однако пока все предложения находятся на стадии тестирования и модернизации; основная причина — низкая эффективность извлечения микропластика, который является существенным компонентом мусорных островов, и связанная с этим экономическая несостоятельность проектов.

В России ситуация с переработкой мусорных отходов выглядит хуже, чем в большинстве промышленно развитых стран. Ежегодно у нас образуется около 70 млн тонн твёрдых коммунальных отходов, каждый год даёт прибавку в 1–2% (по другим данным — до 3%). Из этого количества на долю пластиковых отходов приходится от 3.5 до 5 млн тонн. Перерабатывается лишь малая часть этой массы — не более 7%, остальной мусор вывозится на лицензированные полигоны и стихийные свалки [30]. Такая практика продолжается в

течение десятилетий. Причина нерационального использования мусорных отходов (складирование вместо вторичной переработки в новые продукты) кроется прежде всего в отсутствии в России развитой индустрии переработки бытовых отходов, включая вышедший из употребления пластик. Слабо представлен сортировка отходов. В перерабатываемое вторсырьё превращается лишь 30% образующейся макулатуры и от 10 до 20% полимерных отходов [31]. Такая ситуация вынуждает переработчиков вторсырья увеличивать импорт пластиковых отходов для поддержания существующих мощностей.

Незрелость российского рынка глубокой переработки бытовых отходов и лавинообразный рост ежегодно собираемого мусора (в том числе полимерного) побуждает обратить внимание на самый простой способ утилизации мусора — его сжигание для получения энергии. В настоящее время в России мусоросжигательных заводов меньше десятка (для сравнения, во Франции больше сотни заводов такого профиля). Две отечественные госкорпорации — Ростех и Росатом — и Внешэкономбанк России заключили соглашение о строительстве 25 заводов по сжиганию отсортированного мусора для его переработки в электроэнергию. В настоящее время дочернее предприятие Ростеха уже строит пять мусоросжигательных заводов в Казани и Подмосковье. Успешный опыт строительства и эксплуатации таких заводов может дать толчок развитию этого направления утилизации мусора.

Параллельно идёт работа по созданию индустрии глубокой переработки мусорных отходов. Национальный проект “Экология” предусматривает [32], что к 2024 г. должно перерабатываться 36% отходов, с этой целью должна быть выстроена система раздельного сбора мусора в масштабах страны и построены заводы по его переработке общей мощностью 37 млн тонн. Хороший ориентир здесь — опыт переработки мусора в Европе [33], где лидирующие позиции занимает Швеция. В этой стране перерабатывают до 80% отходов, 18% сжигают и только 2% увозят на полигоны. В основе этого успеха лежит реализованный жителями страны подход, согласно которому мусор просто не должен образовываться, его нужно уничтожать по мере появления.

\* \* \*

С научной точки зрения методы противодействия загрязнению окружающей среды полимерными отходами стали интенсивно изучаться лишь в последнее время. Рост объёмов производства полимеров и ограниченный срок их эксплуатации делает крайне актуальной разработку оптимальных подходов к утилизации полимерного мусора.

Накопление полимерных отходов может быть отсрочено за счёт вторичной их переработки. Однако это требует отдельного сбора и сортировки полимерных отходов, что возможно не всегда. Свойства переработанного продукта часто далеки от свойств исходного полимера по причине изменения (часто необратимого) структуры полимерных материалов в ходе эксплуатации. В связи с этим представляется перспективным развитие безотходных технологий замкнутого цикла, реализуемых без использования органических растворителей.

В конечном итоге полимерные отходы завершают свой жизненный цикл либо при захоронении в почву на свалке, либо в ходе сжигания на мусоросжигательном заводе. Проблема деградации полимеров после захоронения в почву может быть частично решена путём отказа от некоторых полимеров, замены традиционных полимеров на биоразлагаемые, а также за счёт перехода на выпуск композитов/смесей с участием биоразлагаемых полимеров. Однако это не решает всех проблем, особенно с учётом неизбежного образования микропластика в ходе разложения полимерных отходов. Важный аспект обсуждаемой проблемы — грамотная рекультивация свалок с созданием поверх них плодородного почвенного слоя. Универсальным, хотя и не всегда оптимальным с экономической точки зрения методом утилизации полимеров является их сжигание с целью получения энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Shtaudinger H.* Über Polymerisation // *Europ. J. Inorg. Chem.* 1920. № 53. P. 1073–1085.
2. *Dear J.P., Mason N.S.* Lifetime of polymer pipes in water distribution systems // *L.G. Mallinson (ed.) Ageing studies and lifetime extension of materials.* Boston, MA: Springer, 2001.
3. *Schyns Z.O.G., Shaver M.P.* Mechanical recycling of packaging plastics: a review // *Macromol. Rapid Commun.* 2021. № 42. P. 2000415.
4. *Okan M., Aydin H.M., Barsbay M.* Current approaches to waste polymer utilization and minimization: a review // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2019. № 94. P. 8–21.
5. *Ali S.S., Elsamahy T., Koutra E. et al.* Degradation of conventional plastic wasting the environment: a review on current status of knowledge and future perspectives of disposal // *Sci. Total Environ.* 2021. № 771. P. 144719.
6. *Lebreton L., Slat B., Ferrari F. et al.* Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic // *Sci. Rep.* 2018. № 8. P. 4666.
7. *Akdogan Z., Guven B.* Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs // *Env. Pol.* 2019. № 254A. P. 113011.
8. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>
9. *Mazhandu Z.S., Muzenda E., Mamvura T.A. et al.* Integrated and consolidated review of plastic waste management and bio-based biodegradable plastics: Challenges and opportunities // *Sustainability.* 2020. № 12. P. 8360.
10. *Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L.* Production, use, and fate of all plastics ever made // *Sci. Adv.* 2017. № 3. P. 1700782.
11. *Matthews C., Moran F., Jaiswal A.K.* A review on European Union's strategy for plastics in a circular economy and its impact on food safety // *J. Clean Prod.* 2021. № 283. P. 125263.
12. *Chen Y., Zhang Y., Zhang Z.* Occurrence, effects, and biodegradation of plastic additives in sludge anaerobic digestion: a review // *Env. Poll.* 2021. № 287. P. 117568.
13. *Arzhakov M.* Relaxation in physical and mechanical behavior of polymers. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019.
14. *Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. et al.* Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B.* 2018. № 143. P. 172–196.
15. *El-Sayegh S., Romdhane L., Manjikian S.* A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks // *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2020. № 20. P. 34.
16. *Kabanov V.A.* Polyelectrolyte complexes in solution and in bulk // *Russian Chem. Reviews.* 2005. № 74. P. 3–20.
17. *Zejin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B. et al.* Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. № 226A. P. 17–23.
18. *Xiang Y., Lu S., Jiang S.P. et al.* Layer-by-layer self-assembly in the development of electrochemical energy conversion and storage devices from fuel cells to supercapacitors // *Chem. Soc. Rev.* 2012. № 41. P. 7291–7321.
19. *García M.C., Eberhardt N., Sanmarco L.M. et al.* Improved efficacy and safety of low doses of benzimidazole-loaded multiparticulate delivery systems in experimental Chagas disease therapy // *Eur. J. Pharm. Sci.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.105912>
20. *Xu C., Zhang B., Gu C. et al.* Are we underestimating the sources of microplastic pollution in terrestrial environment? // *J. Hazard. Mater.* 2020. № 400. P. 123228.
21. [https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/index\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/index_en.htm)
22. *Di Bartolo A., Infurna G., Dintcheva N.T.* A review of bioplastics and their adoption in the circular economy // *Polymers.* 2021. № 13. P. 1229.
23. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>
24. *Kosloski-Oh S.C., Wood Z.A., Manjarrez Y. et al.* Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of commercial polymers // *Mater. Horiz.* 2021. № 8. P. 1084–1129.
25. *Elmanovich I.V., Stakhanov A.I., Zefirov V.V. et al.* Thermal oxidation of polypropylene catalysed by manganese oxide aerogel in oxygen-enriched supercritical carbon dioxide // *J. Supercritical Fluids.* 2020. № 158. P. 104744.

26. *Jain P., Powell J.T., Smith J.L. et al.* Life-cycle inventory and impact evaluation of mining municipal solid waste landfills // *Environ. Sci. Technol.* 2014. № 48. P. 2920–2927.
27. *Meng F., McKechnie J.* Challenges in quantifying greenhouse gas impacts of waste-based biofuels in EU and US biofuel policies: Case study of butanol and ethanol production from municipal solid waste // *Env. Sci. Tech.* 2019. № 53. P. 12141–12149.
28. *Fojt J., David J., Prikryl R. et al.* A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil // *Sci. Total Environ.* 2020. № 745. P. 140975.
29. *Xu C., Nasrollahzadeh M., Selva M. et al.* Waste-to-wealth: biowaste valorization into valuable bio(nano)materials // *Chem. Soc. Rev.* 2019. № 48. P. 4791–4822.
30. *Говорушко С., Лазарев С., Петухов В., Зелинская Е.* Обращение с твёрдыми коммунальными отходами: Россия на фоне мира // *Астраханский вестник экологического образования.* 2021. № 2. P. 4–31.
31. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р.
32. Паспорт Национального проекта “Экология”. [https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy\\_proekt\\_ekologiya/](https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/natsionalnyy_proekt_ekologiya/)
33. *Milios L., Davani A.E., Yu Y.* Sustainability impact assessment of increased plastic recycling and future pathways of plastic waste management in Sweden // *Recycling* 2018. № 3. P. 33.