ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2022, том 92, № 10, с. 961–970

ОБОЗРЕНИЕ

ОДНОРАЗОВАЯ ПОЛИМЕРНАЯ УПАКОВКА: ПРОБЛЕМА БЕЗ РЕШЕНИЯ?

© 2022 г. А. А. Ярославов[a,*], М. С. Аржаков[a,**], А. Р. Хохлов[a,b,***]

[a] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[b] Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

*E-mail: yaroslav@belozersky.msu.ru
**E-mail: msa60@yandex.ru
***E-mail: khokhlov@presidium.ras.ru

Поступила в редакцию 20.04.2022 г.
После доработки 27.05.2022 г.
Принята к публикации 05.06.2022 г.

Рост объёмов выпуска синтетических полимеров сопровождается увеличением количества полимерных отходов, которые отрицательно воздействуют на окружающую среду. Особого внимания требует ситуация с мусором из пластика с предельно коротким сроком эксплуатации (одноразовая упаковка и тара). Использованный одноразовый пластик с трудом поддаётся переработке, засоряет прибрежные территории и поступает оттуда в моря и океаны, нанося серьёзный ущерб морской фауне. В статье рассматриваются способы минимизации отходов из одноразового пластика, возникающие при этом проблемы и пути их решения.

Ключевые слова: полимерные материалы, одноразовый полимерный пластик, производство, переработка, утилизация, окружающая среда.

DOI: 10.31857/S0869587322100115

За последние несколько десятилетий полимеры прочно заняли одну из лидирующих позиций в общей иерархии современных материалов наряду с металлами и керамикой. Область применения полимеров и материалов на их основе простирается от простейших вариантов бытовой продукции до многокомпонентных смесей, композитов и гибридных конструкций, используемых в электронике, автомобильной и авиакосмической индустрии, строительстве, транспорте, сельском хозяйстве, медицине. Многие изделия, которые раньше производили из традиционных материалов – стекла, металла, дерева, кожи, растительных волокон – теперь изготавливают из пластмассы. Мировое производство пластмасс выросло с 2 млн т в 1950-х годах до 367 млн т в 2020 г. [1]. Ежегодно на эти цели расходуется 4% всей добываемой нефти [2].

Наибольшую долю полимерного рынка составляет полиэтилен (ПЭ), на который приходится примерно треть выпускаемой полимерной продукции. Далее идут полипропилен, поливинилхлорид, полистирол и полиэтилентерефталат.

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.

Эти базовые полимеры – основа десятков тысяч разных видов, марок и сортов пластмасс. В течение более чем 50 лет лидером в полимерной отрасли были США. В 2005 г. первенство перешло к Китаю, на долю которого сейчас приходится более 30% мирового производства полимеров [3]. Китай является также основным потребителем полимеров, перерабатывая около четверти выпускаемого в мире полиэтилена и более трети полипропилена и поливинилхлорида.

Начиная с 1950-х годов в мире было произведено более 8 млрд т синтетических полимеров. При сохранении нынешней тенденции следует ожидать, что в течение следующих 30 лет количество пластика превысит 30 млрд т [4] и на его производство будет расходоваться до 20% общемирового потребления нефти. Вместе с тем широкое применение пластмасс в промышленном производстве и домашнем хозяйстве обернулось для окружающей среды серьёзной угрозой, связанной с бесконтрольным накоплением использованных и ставших ненужными полимерных материалов и изделий. Ежегодно в мире образуется 2 млрд т твёрдых коммунальных отходов [5], из которых на долю пластика приходится примерно 300 млн т, что составляет 70–80% от объёма его ежегодного производства. В связи с этим всё большую актуальность приобретают утилизация полимерных отходов и разработка научно-обоснованной методологии её практической реализации.

Анализ “жизненного цикла” полимерного материала от его производства до уничтожения [6] позволяет выделить следующие основные направления в области минимизации полимерных отходов. Безусловный приоритет – развитие безотходных и экологически безопасных технологий замкнутого цикла, включающих многократную переработку пластиков. Однако все предлагаемые технологии могут лишь отсрочить окончательное уничтожение полимерного мусора, в том числе многократно переработанного, что в настоящее время достигается путём его сжигания и захоронения. Последний вариант подразумевает необходимость широкого использования биоразлагаемых материалов и разработку эффективных способов последующей рекультивации мусорных полигонов.

Для более глубокого понимания “мусорной” проблемы приведём классификацию полимерных материалов по продолжительности их эксплуатации. Полимерные изделия со сроком эксплуатации более 10 лет (материалы строительного назначения, детали и конструкции, используемые в авто-, судо- и авиастроении) составляют не более 1/3 общего объёма производства; со сроком эксплуатации от 1 года до 10 лет (потребительские товары, игрушки, бытовая электроника и др.) – не более 1/4; менее 1 года – до 1/2. Среди последних основное место занимают упаковка и тара с экстремально коротким временем использования, которое часто не превышает нескольких суток или даже часов. Именно подобные одноразовые продукты представляют наибольшую угрозу экологическому состоянию планеты. При этом следует отметить, что упаковочная промышленность выступает основным фактором, определяющим рост мирового спроса на полимеры: различные плёнки, пакеты, бутылки, контейнеры обеспечивают более половины их мирового потребления. Высокие среднегодовые темпы роста производства полимерных плёнок во многом обусловлены возрастающими потребностями сельского хозяйства и пищевой промышленности. Увеличение производства и потребления упаковочного пластика связано с его очевидными преимуществами перед другими материалами (герметичность, стойкость к агрессивным средам, низким температурам и механическим воздействиям, способность к быстрому и качественному свариванию, прозрачность, лёгкость обработки, небольшая масса и низкая стоимость).

Количество производимого одноразового пластика неуклонно возрастает из-за быстрого роста населения Земли, увеличения численности городского населения, активного использования пластика в развивающихся странах, развития упаковочной индустрии и других факторов. Соответственно, возрастает необходимость нейтрализации отрицательного воздействия отходов пластика на окружающую среду.

Существует несколько путей решения этой проблемы. Как отмечено выше, первый и самый привлекательный – повторное использование полимерных отходов или вторичная их переработка (рециклинг). В идеале вторичная переработка пластика может привести к появлению новой цикличной (безотходной) экономики, основанной на многократном использовании единожды произведённого полимерного материала. Второй путь – сжигание пластикового мусора с целью получения энергии. Третий – его захоронение на специально оборудованных площадках (мусорных полигонах). Оптимальное соотношение вкладов этих способов нейтрализации пластиковых отходов оценивается следующим образом: рециклинг >> сжигание > захоронение. Очевидное преимущество имеет вторичная переработка отходов: она не только возвращает на рынок полимерные продукты, но и уменьшает выброс в атмосферу парниковых газов предприятиями по производству пластмасс.

Помимо этого от накопившегося мусора избавляются, экспортируя его за пределы страны-производителя. До недавнего времени таким образом ежегодно вывозилось около 13 млн т произ-

водимого пластикового мусора, или 4% его общего объёма; бóльшая доля “мусорного экспорта” (около 70%) приходилась на развитые страны (США, ЕС и Япония) [7]. Основным покупателем пластиковых отходов в течение последних лет был Китай, который принимал от половины до 2/3 глобального импорта мусора из пластмасс. Однако в 2018 г. экономика Китая достигла уровня, при котором количество производимых пластиковых отходов полностью покрывало потребности местных перерабатывающих предприятий. В результате правительство объявило о запрете на импорт некоторых видов пластика и сильно загрязнённых материалов. Вслед за Китаем запрет на ввоз пластикового мусора ввели страны Юго-Восточной Азии – Таиланд, Малайзия и Вьетнам. Эти события заставили европейские страны и США – основных поставщиков пластиковых отходов – пересмотреть практику их утилизации и повысить стандарты по качеству материалов, получаемых из вторично переработанных полимеров. Наконец, значительный сегмент рынка занимает теневая торговля пластиковым мусором, общий ежегодный объём которой оценивается в 10–12 млрд долл. [7]. Экспорт и теневая торговля не влияют на общую картину утилизации мусора: их вклад незначителен и с трудом поддаётся количественной оценке.

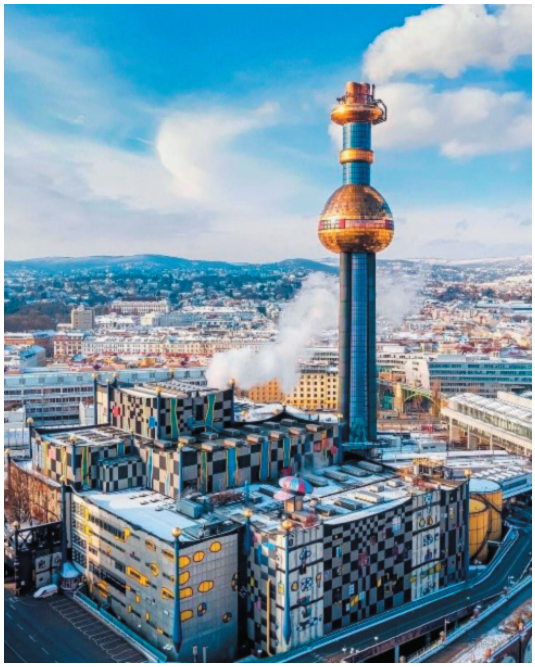
Источниками наиболее распространённого пластикового мусора являются два полимера – полиэтилен и полипропилен, на которые приходится более половины всех полимерных отходов. Это связано с их активным использованием для упаковки товаров и выпуска разнообразных одноразовых изделий. Развитие программы по переработке пластикового мусора привело к подготовке единой классификации полимеров. Впервые такая классификация была предложена Американским обществом пластмассовой промышленности в 1988 г. Окончательная на сегодня версия списка, одобренная решением Еврокомиссии [8], выглядит следующим образом (рис. 1).

Для вторичной переработки полимеров (полимерных отходов) используют различные технологии. *Механический рециклинг* основан на сохранении физических свойств полимеров без существенного нарушения их химического строения. Он включает измельчение (нарезка, дробление, перетирание) пластика и получение полупродукта, используемого для изготовления новых пластмассовых изделий. Этот способ не требует дорогостоящего оборудования и относительно легко реализуем. *Химический рециклинг* сопровождается деструкцией полимеров до исходных мономеров или других веществ с меньшей молекулярной массой, из которых получают новые полимеры или чистые химические соединения. Таким образом можно перерабатывать загрязнённый (несортированный) пластик. При *термическом рециклинге* (по сути, химическом рециклинге, но проводимом при высокой температуре) из полимеров получают синтез-газ (смесь монооксида углерода и водорода) и углеводородные смеси различного состава (бензин, мазут и др.), которые в дальнейшем применяются для производства тепловой и электрической энергии. Все варианты рециклинга наряду с перечисленными выше достоинствами имеют ряд существенных недостатков, среди которых выделяются необходимость тщательной сортировки мусора для извлечения пластика одного химического состава (особенность механического рециклинга), низкая эффективность (проблема химического рециклинга) и большие энергозатраты (связаны с химическим и термическим рециклингом). Эти причины сдерживают развитие рынка вторичной переработки пластмасс.

Рис. 1. Маркировка полимеров для удобства распознавания и использования:
01 PET (российский аналог ПЭТФ) – полиэтилентерефталат; 02 PE-HD, HDPE (ПЭНД) – полиэтилен высокой плотности (низкого давления); 03 PVC (ПВХ) – поливинилхлорид; 04 PE-LD, LDPE (ПЭВД) – полиэтилен низкой плотности (высокого давления); 05 PP (ПП) – полипропилен; 06 PS (ПС) – полистирол; 07 OTHER (O) – прочие (к этой группе относится любой другой пластик, который не может быть включён в предыдущие группы); 09 ABS – смешанный пластик

Сжигание рассматривается как дополнительная возможность утилизации пластикового мусора. Этот способ практически безальтернативен для композитных пластиков, которые не могут быть вторично переработаны из-за своего состава, неправильного сбора/сортировки/хранения или потери потенциала к переработке в ходе многократных процедур рециклинга. Современные мусоросжигательные заводы обеспечивают дожигание газов при высокой температуре (до 1400°C) и их последующую эффективную очистку [9]. Это приводит к минимальным выбросам в атмосферу токсичных веществ, прежде всего различных диоксинов, известных своей высокой нежелательной активностью по отношению к живым организмам. Благодаря современным технологиям строительство мусоросжигательных заводов возможно в крупных городах недалеко от места образования и накопления отходов. Примерами таких заводов могут служить Шпиттелау в Вене и Амагер Бакке в Копенгагене, которые снабжают городские сети электроэнергией и горячей водой (рис. 2). Благодаря оригинальному оформлению завод Шпиттелау стал одной из достопримечательностей австрийской столицы, а на крыше за-

а



б

Рис. 2. Мусоросжигательные заводы Шпиттелау в Вене (*а*) и Амагер Бакке в Копенгагене (*б*)
Фотографии из открытых источников

вода Амагер Бакке расположены рекреационная зона Копенхилл и лыжный склон.

Пластиковый мусор, не попавший во вторичную переработку и не сгоревший в печах мусоросжигательных заводов, в лучшем случае поступает на мусорные полигоны или, что хуже, уничтожается путём открытого сжигания или попадает в окружающую среду. Такая пёстрая картина не позволяет достоверно оценить вклад различных способов утилизации пластика. Считается, что сегодня в мире повторно используется от 9 до 30% пластмасс [7]. Остальной пластик оказывается на мусорных полигонах, где медленно разлагается в течение десятков и сотен лет. Однако в этой картине никак не отражена судьба пластика, обошедшего все “ловушки” и в итоге попавшего в окружающую среду. Между тем это важная составляющая часть пластикового мусора, которая во многом определяет состояние природной среды.

Очевидно, что особую тревогу вызывает судьба одноразового пластика. Согласно Директиве Евросоюза по одноразовым пластикам (2019) [10], под этим термином понимают “товар, частично или полностью изготовленный из пластика, который был разработан, произведён и позиционируется на рынке как продукт, для которого не предусмотрен возврат производителю и повторное использование с целью, для которой он был произведён”. То есть речь идёт о полимерном материале (или изделии из него), принципиальной особенностью которого является однократное использование. К этой категории относится упаковка (плёнки, пакеты, контейнеры, коробки, бутылки). Одноразовая посуда и столовые приборы, соломинки, трубочки и мешалки для напитков и прочие товары чаще других попадают на стихийные свалки, откуда дождями и талыми водами смываются в реки, а затем в моря и океаны, формируя гигантские мусорные острова [11]. Ежегодно в Мировой океан попадает от 4 до 12 млн т полимеров или 1–3% производимого пластикового мусора [12], по другим данным – около 11 млн т [13]. Оказавшись в морской среде, пластик распадается на всё более мелкие фрагменты. Согласно оценкам, в океане находится от 5 до 50 трлн фрагментов пластика [14], многие из которых имеют размер менее 5 мм (так называемый микропластик). На дне мирового океана скопилось примерно 14 млн т микропластика [15].

Пластик поистине вездесущ. Крупнейшее его скопление обнаружено на дне Средиземного моря: в верхнем слое отложений содержится 1.9 млн пластиковых частиц на м^2 [16]. Пластиковый пакет и конфетные обёртки найдены в Марианской впадине на глубине более 10 км, а частицы микропластика – в снегах Эвереста на высоте 8440 м. Полимерные объекты (включая микропластик) попадают в организм морских животных, которые могут ими подавиться, умереть от голода или отравления. Ежегодно миллионы тонн микрочастиц пластика проникают в питьевую воду и продукты питания людей во всём мире. Например, концентрация микрочастиц в бутилированной (питьевой) воде может составлять до 10 тыс./л [17]. При этом масштабные исследования о последствиях попадания пластиковых микрочастиц в организм человека до сих пор не проводились. Однако описаны многочисленные примеры отрицательного воздействия микропластика на модельных животных, начиная с моллюсков и рако-

образных и заканчивая рыбами, птицами и млекопитающими [18–22].

Результаты проведённых экспериментов, осторожные оценки экспертов и не слишком оптимистичные перспективы заставляют пересмотреть имеющуюся практику производства, использования и утилизации одноразового пластика. Многие страны, включая ЕС, ведут активную работу, направленную на решение этой проблемы с целью формирования безотходной экономики, основанной на многократных циклах использования полимерной продукции. Можно выделить несколько основных направлений работы по изменению ситуации с одноразовым пластиком. Рассмотрим их в порядке приоритетности, как это описывается в многочисленных статьях на тему “мир без пластика (или с минимальным его присутствием)”.

Распространение и совершенствование рециклинга. Этот очевидный путь должен обеспечить возвращение использованного пластика в качестве сырья для производства новых полимеров и, соответственно, уменьшить спрос на первичный пластик. Обе эти цели если и достижимы, то в весьма отдалённой перспективе. Собственно рециклинг столкнулся с трудностями, связанными прежде всего со сбором и сортировкой пластикового мусора.

Процедура сбора отходов домохозяйств в уличные контейнеры отработана и активно применяется главным образом в промышленно развитых странах. По данным Программы ООН по окружающей среде, систематический сбор и вывоз мусора в различных регионах мира организован весьма неравномерно: если в Северной Америке доля вывезенного мусора составляет 100%, то в Африке – от 25 до 70%. При этом более 2 млрд жителей планеты не имеют доступа к услугам по сбору и вывозу отходов [23]. Если в странах ЕС собирается и перерабатывается около 30% пластикового мусора [3], то в США этот показатель – всего 9% [24]. Согласно существующим прогнозам, масштабы переработки пластикового мусора будут возрастать, и к 2050 г. через рециклинг будет проходить до 50% всех отходов из пластмассы [3].

Много проще собирать пластиковые отходы, полученные в ходе промышленного производства: куски, ленты, обрезки труб, излишки материала после обработки изделий, некондиционный товар, россыпь полимерного гранулята и др. Такие отходы не содержат примесей или загрязнений и потому активнее подвергаются рециклингу, чем отходы из бывших в употреблении материалов и изделий. Нерешённой остаётся проблема переработки композитов, в которых полимер является одним из компонентов материала/изделия. Такие композиты не поддаются сортировке и поэтому не перерабатываются наиболее распространённым механическим способом.

Имеющийся опыт говорит о том, что системы переработки не смогли обеспечить эффективную утилизацию полимерных отходов и вернуть в производство достаточное количество полимерного материала, чтобы заметно снизить спрос на первичный пластик. Причины весьма скромных успехов в этой области связаны с постоянно возрастающим объёмом первичного производства полимеров и их невысокой ценой, отсутствием во многих странах доступных процедур сбора и сортировки отходов, невозможностью переработки смесевых и композитных пластиковых изделий.

Отказ от использования некоторых видов полимерной продукции. В июле 2021 г. в Евросоюзе вступил в силу запрет на производство и продажу одноразовых изделий из пластика [10]. В этот список входят пластиковые тарелки и столовые приборы, ватные палочки, трубочки и мешалки для напитков, пластиковые держатели для воздушных шаров, стаканы и контейнеры для еды и напитков из полистирола и некоторые другие полимерные изделия. К 2025 г. в странах ЕС будет вдвое снижено потребление тонких пластиковых пакетов. Ограничения Евросоюза коснулись товаров, которые все вместе составляют не очень представительную группу полимерных изделий. Однако они практически не поддаются переработке, в основном из-за красителей (цветной пластик), неустранимых загрязнений и отсутствия маркировки, или потому, что они изготовлены из смеси разнородных по природе материалов (пластик и бумага, пластик и хлопок). Кроме того, такие изделия трудно извлечь из общего потока отходов.

Дополнительная опасность подобных продуктов заключается в их высокой мобильности: эти лёгкие изделия переносятся на большие расстояния, попадая в итоге в реки и оттуда в моря и океаны. Масштабы производства такой продукции впечатляют. Например, в Германии ежегодно используют 2.8 млрд одноразовых кофейных стаканчиков, в Греции этот показатель составляет 600 млн, в Великобритании – 3 млрд. Каждый стаканчик служит в среднем 15 минут и затем становится мобильным мусором. Перерабатывается не более 1% использованных стаканчиков [25]. Причина столь низкого рециклинга – сложность разделения пластика и картона, из которых они сделаны.

Аналогичная ситуация складывается с одноразовыми пластиковыми бутылками, тарелками и столовыми приборами. Первые (вместе с крышками и колпачками) – наиболее распространённый вид мусора на пляжах Европы, вторые входят в первую десятку загрязнителей европейских пляжей. Этот пластик в итоге оказывается в мо-

рях, на него сейчас приходится 85% морского мусора в водах Европы. Проведённые среди граждан Евросоюза опросы показали, что 92% населения одобряют меры по сокращению производства/потребления одноразового пластика и обеспокоены отрицательным воздействием пластика на окружающую среду (87%) и здоровье (74%) [25].

Замена одноразовой упаковки (тары) на многоразовую. Здесь предлагается несколько вариантов: от использования традиционных полимеров (полипропилена, полистирола и др.) для производства возвратной многоразовой посуды, которую можно сдать в магазин/кафе после употребления, до контейнеров и бутылок, изготовленных из традиционных материалов (бумага, стекло, металл), которые можно принести с собой. Изделия из полипропилена пригодны для мытья в посудомоечной машине и могут быть использованы многократно (до 400 раз). Этот путь становится более привлекательным для потребителя, если в цену продукта добавлен депозит (залоговая цена), который можно вернуть при возврате товара. Способ опробован в различных странах (Германия, Канада, США, Австралия) и доказал свою жизнеспособность.

Возврат к традиционной посуде на рынке готовой (уличной) еды выглядит несколько архаично. Дело в том, что 100 лет назад человечество совершило шаг в противоположном направлении: от многоразовой металлической кружки к одноразовому бумажному стаканчику. В 1908 г. в США была подана заявка на патент [26] с описанием “безопасной чашки”, которая должна была прийти на смену негигиеничной железной кружке. Материалом для новой чашки служила водонепроницаемая бумага. В 1910 г. была создана “Компания индивидуальной чашки для питья”, которая сконструировала автоматы по продаже чашек в общественных местах. К 1960 г. продажи бумажных стаканчиков приносили ежегодный доход в размере 50 млн долл. В последующем объём продаж только нарастал и вышел на новый уровень с появлением одноразовой пластиковой посуды. Изменить эту ситуацию едва ли возможно. Рынок простой в изготовлении, удобной, лёгкой и дешёвой одноразовой посуды сохранится, хотя, возможно, и будет несколько потеснён конкурентами, предлагающими многоразовую посуду из стекла и металла.

Замена на биоразлагаемые (компостируемые) полимеры и композиты. Альтернативой традиционному пластику выступают биоразлагаемые полимеры, которые принято разделять на две большие группы. К первой относятся синтетические полимеры, содержащие добавку в виде солей переходных металлов, способную ускорять разрушение пластика при воздействии ультрафиолета и кислорода воздуха [27, 28]. В случае полиэтилена и пропилена, наиболее часто используемых для получения одноразового пластика, в качестве такой добавки применяют смесь солей, известную как d2w, производства фирмы Symphony Environmental (Великобритания). После некоторого периода стабильности, который обеспечивается антиоксидантами, входящими в состав d2w, начинается расщепление углерод-углеродных связей в макромолекулах, при этом пластмассовые изделия становятся хрупкими и распадаются на мелкие хлопьевидные частицы. В дальнейшем частично разрушенный и одновременно окисленный пластик подвергается действию микроорганизмов, которые расщепляют его до углекислого газа и воды. Так выглядит утилизация оксоразлагаемых полимерных материалов.

Второй вариант – использование природных биоразлагаемых полимеров для производства пластмассовых изделий [29]. Сырьём для их производства, обычно служат растительные культуры (пшеница, кукуруза, картофель, сахарный тростник, соя). Сырьё напрямую перерабатывают в полимер (целлюлоза, крахмал) либо подвергают ферментации с последующим выделением мономера и его полимеризацией (полилактид, полигидроксибутират). Наибольшей популярностью пользуются биоразлагаемые пакеты из кукурузного или картофельного крахмала; из синтетического полилактида делают биоразлагаемую пищевую упаковку и одноразовую посуду.

Однако эта оптимистичная картина осложняется рядом неприятных деталей. Фрагментация оксоразлагаемого пластика требует наличия кислорода. Его очень мало на стандартных полигонах твёрдых бытовых отходов (ТБО), особенно во внутренних частях полигонов, что резко снижает эффективность биоконверсии пластика. Помимо кислорода, на скорость разрушения оксоразлагаемого пластика влияют температура, влажность, интенсивность света. Контролировать эти параметры в условиях полигона невозможно, и поэтому нельзя назвать точные сроки разложения такого пластика в естественной среде. И, наконец, промежуточной стадией разрушения пластика является формирование нежелательного микропластика, а инициирующая оксоразложение добавка d2w и её аналоги токсичны из-за присутствия тяжёлых металлов. Добавки делают невозможным рециклинг оксоразлагаемх полимеров. Эти причины привели к тому, что в 2019 г. Еврокомиссия рекомендовала ввести запрет на использование оксоразлагаемых пластиков на территории Евросоюза [10], который начал действовать с июля 2021 г.

Не лучше обстоит дело с биоразлагаемыми пластиками на основе природного сырья. Например, утилизация материалов из полилактида требует специальных условий: 80%-ной влажности

воздуха и температуры 55–70°С [30]. Такие условия можно обеспечить только при промышленном компостировании (биологическом окислении). Без выполнения этих условий, например, на полигоне ТБО, полилактид деструктирует очень медленно, подобно разложению небиопластиков с периодом полного разрушения в сотни лет. Поэтому сложившееся у многих представление о том, что биоразложение начнётся после закапывания биопластика в землю или выбрасывания его в море, оказывается не более чем иллюзией.

Необходимо принимать во внимание и то обстоятельство, что сырьём для производства биоразлагаемых пластиков выступают растительные культуры, используемые в качестве пищи (кукуруза, пшеница, сахарный тростник). Таким образом, производство биопластика конкурирует с производством продовольствия. Сокращение пахотных земель и уменьшение водных ресурсов может привести к серьёзной коррекции перспективы массового производства биопластиков.

В завершение этого раздела остановимся на результатах принципиального и наглядного исследования, посвящённого анализу деградации пакетов из коммерческого пластика: биоразлагаемого, оксоразлагаемого и компостируемого. В качестве контроля были взяты пакеты из полиэтилена высокой плотности (традиционный вид упаковки) [31]. Образцы выдерживали в течение трёх лет на открытом воздухе, в земле и в морской воде, а также в контролируемых лабораторных условиях. Все образцы, хранившиеся на воздухе (в том числе полиэтиленовый пакет), распались на мелкие фрагменты, то есть микропластик. Пакеты из компостируемого пластика (из природных полимеров) растворились в морской среде (размер частиц растворённого пластика не анализировали), но сохранили целостный вид после пребывания в почве. Оксоразлагаемые и биоразлагаемые пакеты мало изменились после пребывания в почве и морской воде, более того, с ними вполне можно было идти в магазин за покупками. И это несмотря на имеющуюся на пакетах маркировку стандарта EN 13432, который определяет предельный 6-месячный срок их разложения. Неутешительный вывод авторов заключается в следующем: нет никаких оснований полагать, что оксо- и биоразлагаемые пластиковые пакеты имеют очевидное преимущество перед обычными пластиковыми пакетами с точки зрения их утилизации.

Съедобная пищевая плёнка и упаковка. До недавнего времени такая формулировка большинством населения воспринималась как экзотика. На самом деле съедобные плёнки известны уже много веков, многие из нас регулярно встречаются с этим видом товара в повседневной жизни. Еще в XVIII в. в Японии использовалась одноразовая посуда, изготовленная из прессованной рисовой муки: после использования её можно было съесть. В начале XX в. началось промышленное производство вафельных рожков для мороженого. В 1933 г. была разработана технология получения искусственных белковых (коллагеновых) оболочек для упаковки колбасных изделий.

Появление новых полимерных материалов и новых технических возможностей стимулировало поиск решений, направленных на расширение ассортимента полимерной продукции. Одновременно пришло осознание важности поддержания экологической чистоты на планете. Вместе эти факторы активизировали работы по созданию биоразлагаемых полимеров, в том числе биоразлагаемой (съедобной) упаковки.

В качестве основы для получения плёнки (тары) предложено использовать полимеры животного или растительного происхождения – белки (желатин, коллаген, глютен, казеин) и полисахариды (крахмал, целлюлоза и её производные, альгинат, агар, хитин/хитозан, декстрины, пектины) [32, 33]. Из этих полимеров или их смесей с пшеничной/рисовой мукой, растительными волокнами, зёрнами злаковых и бобовых культур делают материалы для формирования съедобной посуды (стаканы, чашки, ложки, трубочки для коктейля и пр.). Создана съедобная бумага для упаковки бутербродов, которая растворяется, едва попав в рот, и коробки для еды, изготовленные из картофельной муки по технологии, применяемой в производстве чипсов. Описаны материалы для производства съедобных пакетов на основе крахмала, которые практически мгновенно растворяются в горячей воде (медленнее в холодной). По утверждению разработчиков, полученный раствор можно пить без вреда для здоровья. Если после употребления пищи съедобная упаковка будет выброшена, она не загрязнит почву и станет отличной пищей для микроорганизмов. “Съедобное направление” в полимерной области постепенно занимает всё более заметное положение. У него появился свой термин “EdPack” (от “edible packaging” – с англ. “съедобная упаковка”). Этой идеей заинтересовались крупные компании, пока на уровне оригинальных рекламных ходов. Так, производитель автомобилей “Лендровер” выпустил иллюстрированный справочник по выживанию в пустыне, который можно съесть в экстремальной ситуации.

При всей очевидной перспективности это направление не сможет в обозримом будущем составить конкуренцию не только традиционному пластику, но и биоразлагаемым полимерам. Область распространения съедобного пластика пока не выходит за пределы пищевых производств, и нынешнее повышение внимания к такому мате-

риалу воспринимается скорее как масштабный эксперимент, цель которого – нащупать области потенциального интереса со стороны производителей и потребителей этой нетипичной продукции.

Уже сейчас понятны вопросы, которые требуют профессионального обсуждения. Первый касается гигиенических свойств защитной съедобной упаковки (тары). С одной стороны, она по определению должна быть съедена. С другой, она же защищает основной продукт от негативного внешнего воздействия (пыль, влага, человеческие прикосновения т.д.). Получается, что нужно думать о защите само́й съедобной упаковки. Съедобные стаканчики можно защитить дополнительным внешним слоем из материала (например, картона), который будет утилизирован после поедания стаканчика. Но это лишает процедуру потребления утреннего кофе простоты и лёгкости. Съедобность стаканчика означает одновременно его хрупкость, а значит, ненадёжность, что ставит под сомнение сохранность такого товара во время грузовых перевозок. И наконец, можем ли мы называть упаковкой обёртку, которую мы съедаем? Или это просто часть продаваемого товара? Это меняет традиционные представления о многофункциональной роли упаковки (сохранение, идентификация, информация, транспортировка, реклама) и требует развития новых подходов к оформлению и продвижению товара.

В России ситуация с отработанным пластиком выглядит не слишком оптимистично. Ежегодно 3 млн т пластика превращается в отходы, из них в рециклинг вовлекается не более 7% и более 90% попадает на полигоны ТБО [34]. Причины низкой эффективности переработки пластика – отсутствие налаженной системы его сбора и сортировки, а также невысокий спрос на вторичную продукцию. Последние 30 лет мусорные отходы в России в основном складировались на стихийных свалках. В последнее время увеличилась доля мусора, попадающего на сертифицированные полигоны ТБО.

Такая картина типична и для судьбы одноразового пластика. Массовое производство этого вида товаров в России началось на рубеже XX–XXI вв. и быстро заняло два сегмента рынка – упаковку и тару. Хорошо известные примеры одноразовой упаковки – плёнка и пакеты, пластиковой тары – одноразовая посуда. Замечательные свойства плёнки, удобство пластиковых пакетов, лёгкость и простота использования пластиковой посуды стимулируют развитие производства этих товаров. Ежегодно в России изготавливается более 40 млрд мешков и одноразовых пакетов и более 14 млн шт. пластиковой посуды, доля одноразовой составляет около 80% [35, 36]. С другой стороны, Россия вслед за Европой готовится принять ограничительные меры по производству и использованию некоторых видов одноразовых пластиковых товаров и активизировать переработку пластикового мусора. Эта программа может столкнуться с теми же проблемами, которые характерны для всего рынка переработки пластиковых отходов: отсутствием организованной системы сбора/сортировки мусора, нехваткой мусороперерабатывающих комбинатов, нежеланием компаний перерабатывать смесевые и композитные полимерные материалы, ограниченными объёмами производства и сферами применения переработанных пластиков и др. Дополнительная проблема – загрязнение пищевыми отходами плёнок и тары, поступающих из домохозяйств, что резко сужает их пригодность для вторичной переработки. По этой причине на переработку предпочитают брать чистую плёнку, поступающую с предприятий. В целом приходится признать, что переработка мягкого пластика, собираемого у населения в России, происходит с понижением качества продукции. Из полиэтиленовой плёнки делают, например, полимерпесчаную плитку, которая после истечения срока эксплуатации отправляется на полигон, поскольку переработать её невозможно.

Глобальным трендом становится отказ от одноразовых пластиков или резкое уменьшение его использования. Проведённые в России опросы показали, что подавляющее большинство россиян (85%) готовы отказаться от пластиковой посуды [37]. Это направление получает поддержку со стороны бизнеса: многие крупные торговые центры перестают выдавать бесплатные пакеты или заменяют их на более экологичные бумажные. Другим выходом из “мусорного кризиса” может быть сжигание мусора для получения энергии. Выше говорилось, что современные мусоросжигательные заводы обеспечивают сжигание мусора при высоких температурах и снабжены системами для эффективного улавливания токсичных газов – диоксинов. Это позволяет строить заводы в крупных городах, не опасаясь отрицательных последствий. Такой способ утилизации мусора широко распространён в мире. Например, в Японии сжигается 80% всех отходов, во Франции – 35%, в Германии – 32%, в Великобритании – 31%, в Италии – 19%, в США – 13% [34]. Наконец, остаётся вариант захоронения мусора на полигонах ТБО. Нужно лишь, чтобы это захоронение проводилось с учётом всех требований к организации и функционированию подобных сооружений.

* * *

Постоянно увеличивающиеся объёмы выпуска синтетических полимеров и неконтролируемый рост количества вышедших из эксплуатации

полимерных материалов/изделий вынуждают обратиться к поиску способов минимизации отрицательного воздействия пластикового мусора на окружающую среду. Особого внимания требует ситуация с мусором, полученным из одноразового пластика. Речь идёт об упаковке и таре, доля которых в общем выпуске полимеров составляет около 50%. Одноразовый пластик представлен в различных сферах человеческой деятельности – от пищевой промышленности до строительства. Он отличается малым весом, большим занимаемым объёмом, часто содержит инородные фрагменты (полимеры иной природы, надписи, цветные вставки и пр.) и не имеет маркировки и потому представляет мало интереса для переработчиков мусора. Попытки изменить ситуацию (активизация рециклинга, отказ от неперерабатываемого пластика, замена традиционного синтетического пластика на биодеградируемый, популяризация многоразовой упаковки и тары) сконцентрированы в основном в развитых странах и пока не затрагивают страны бедные и развивающиеся, где сохранению благоприятной экологической обстановки уделяется заметно меньше внимания. Примерно четверть населения планеты лишена доступа к организованному сбору и сортировке отходов, лишь немногим странам удаётся собирать, перерабатывать и утилизировать мусор.

Выполнивший свою функцию одноразовый пластик засоряет прибрежные территории и поступает оттуда в моря и океаны, нанося серьёзный ущерб морской фауне. Попавшие в океан полимерные материалы/изделия превращаются в микропластик – наиболее опасную разновидность пластикового мусора. Попытки собрать океанский (микро)пластик и отправить его на утилизацию пока успехом не увенчались. Принимаемые меры по уменьшению пагубного влияния (микро)пластика на окружающую среду не сократили его поток в океаны. Несмотря на то, что в настоящее время предложены и апробированы различные пути развития и оптимизации производства, рециклинга и утилизации одноразовых пластиковых изделий, проблема борьбы с полимерными отходами остаётся открытой. В сложившейся ситуации необходим поиск более эффективных научно-технологических решений. Однако успешное продвижение в этом направлении требует учёта целого ряда социально-экономических аспектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/
2. *Hopewell J., Dvorak R., Kosior E.* Plastics recycling: challenges and opportunities // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 2009. V. 364. P. 2115–2126.
3. Plastics – the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data. PlasticsEurope, 2020.
4. *Geyer R., Jambeck J., Law K.* Production, use, and fate of all plastics ever made // Sci. Adv. 2017. № 7. e1700782.
5. *Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F.* What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 / Urban Development Series. Washington, DC: World Bank, 2018.
6. *Ярославов А.А., Аржаков М.С., Хохлов А.Р.* Жизненный цикл полимерного материала: проблемы и перспективы // Вестник РАН. 2022. № 1. С. 15–22; *Yaroslavov A.A., Arzhakov M.S., Khokhlov A.R.* The Life Cycle of Polymer Materials: Problems and Prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2022. № 1. P. 18–24.
7. Improving Markets for Recycled Plastics: Trends, Prospects and Policy Responses. Paris: OECD Publishing, 2018.
8. Commission decision of 28 January 1997 establishing the identification system for packaging materials pursuant to European Parliament and Council Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste (97/129/EC).
9. *Strobel R., Waldner M.H., Gablinger H.* Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant // Waste Manag. 2018. V. 73. P. 301–306.
10. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment.
11. *Schmidt C., Krauth T., Wagner S.* Export of plastic debris by rivers into the sea // Environ. Sci. Technol. 2017. V. 51. P. 12246–12253.
12. *Boucher J., Friot D.* Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources. Gland, Switzerland: IUCN, 2017.
13. *Lau W.W.Y., Shiran Y., Bailey R.M. et al.* Evaluating scenarios toward zero plastic pollution // Science. 2020. V. 369. P. 1455–1461.
14. Throwing Away the Future: How Companies Still Have It Wrong on Plastic Pollution “Solutions”. Greenpeace USA, 2019.
15. *Barrett J., Chase Z., Zhang J. et al.* Microplastic Pollution in Deep-Sea Sediments From the Great Australian Bight // Frontiers in Marine Science. 2020. № 7. P. 576170.
16. *Kane I.A., Clare M.A., Miramontes E. et al.* Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation // Science. 2020. V. 368. P. 1140–1145.
17. Microplastics in drinking-water. Geneva: World Health Organization, 2019.
18. *Amin R.Md., Sohaimi E.S., Anuar S.T., Bachok Z.* Microplastic ingestion by zooplankton in Terengganu coastal waters, southern South China Sea // Mar. Pollut. Bull. 2020. V. 150. P. 110616.
19. *Cunningham E.M., Mundye A., Kregting L. et al.* Animal contests and microplastics: evidence of disrupted behaviour in hermit crabs Pagurus bernhardus // R. Soc. Open. Sci. 2021. № 8. P. 211089.

20. *Galafassi S., Campanale C., Massarelli C. et al.* Do freshwater fish eat microplastics? A review with a focus on effects on fish health and predictive traits of MPs ingestion // Water. 2021. № 13. P. 2214.
21. *Wang L., Nabi G., Yin L. et al.* Birds and plastic pollution: recent advances // Avian. Res. 2021. № 12. P. 59.
22. *Prata J.C., daCosta J.P., Lopes I. et al.* A one health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health // Sci. Total Environ. 2021. V. 777. P. 146094.
23. Global Waste Management Outlook. UNEP/ISWA, 2015.
24. Advancing Sustainable Materials Management: 2015 Fact Sheet. US Environmental Protection Agancy, 2018.
25. *Miller S., Bolger M., Copello L.* Reusable solutions: how governments can help stop single-use plastic pollution. A study by the Rethink Plastic alliance and the Break Free From Plastic movement. Oxford: 3Keel, 2019.
26. US patent 1032557.
27. *Kérouani S., Djerboua F., Sadoun T.* Efficient enhancement in polyethylene biodegradation as a consequence of oxidative fragmentation promoted by pro-oxidant/pro-degradant metal stearate // J. Polym. Eng. 2018. V. 38. P. 625–634.
28. *Liu X., Gao C., Sangwan P. et al.* Accelerating the degradation of polyolefins through additives and blending // J. Appl. Polym. Sci. 2014. V. 131. https://doi.org/10.1002/app.40750
29. *Vikhareva I.N., Buylova E.A., Yarmuhametova G.U. et al.* An overview of the main trends in the creation of biodegradable polymer materials // J. Chem. 2021. V. 2021. https://doi.org/10.1155/2021/5099705
30. *Lunt J.* Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers // Polym. Degrad. Stab. 1998. V. 59. P. 145–152.
31. *Napper I.E., Thompson R.C.* Environmental Deterioration of Biodegradable, Oxo-biodegradable, Compostable, and Conventional Plastic Carrier Bags in the Sea, Soil, and Open-Air Over a 3-Year Period // Environ. Sci. Technol. 2019. V. 53. P. 4775–4783.
32. Polymers for Food Applications / T. Gutiérrez (ed.). Cham: Springer, 2018.
33. *Katiyar V.* Sustainable Polymers for Food Packaging: An Introduction. Berlin, Boston: De Gruyter, 2020.
34. Мусорная реформа // Бюллетень Счётной палаты Российской Федерации. 2020. № 9.
35. Российский рынок тары и упаковки: итоги 2019 г., прогноз до 2022 г. Аналитический отчёт NeoAnalytics. https://www.neoanalytics.ru/rossiiskii-rynok-tary-i-upakovki-2020-1/
36. Российский рынок одноразовой посуды: итоги 2020 г., прогноз до 2024 г. Аналитический отчёт NeoAnalytics. https://www.neoanalytics.ru/rossiiskii-rynok-odnorazovoi-posudy-2021-1/
37. Результаты опроса ВЦИОМ 05.05.2019. ТАСС, 2019.