

КОНЦЕПЦИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ И ОЧИСТКИ МИРОВОГО ОКЕАНА

© 2025 г. С.Н. Чвалун^{а*}, М.А. Щербина^{а**}, А.В. Быстрова^{а***}, А.М. Музафаров^{а****}

^аИнститут синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

^{*}E-mail: serge@ispm.ru

^{**}E-mail: max-shcherbina@yandex.ru

^{***}E-mail: bystrova@ispm.ru

^{****}E-mail: aziz@ispm.ru

Поступила в редакцию 20.03.2025 г.

После доработки 20.03.2025 г.

Принята к публикации 10.05.2025 г.

Загрязнение мирового океана пластиком — актуальная проблема международного уровня. По самым скромным оценкам, ежегодно в океан выбрасываются миллионы тонн пластика, а площадь Большого тихоокеанского пятна составляет 1.5 млн км².

К сожалению, сегодня международному сообществу навязываются подходы к решению этой проблемы, не имеющие под собой серьёзного научного обоснования и глубоко противоречивые в своей основе. Суть предлагаемых развитыми государствами мер сводится к фиксации текущего положения вещей, когда небольшой круг стран обладает развитой промышленностью и технологиями (в том числе производством полимерных материалов в широком ассортименте), а развитие остального мира искусственно сдерживается исходя из экологических соображений.

Единственный выход из сложившейся ситуации — разработка системной, суверенной концепции РАН, направленной на решение проблемы полимерного мусора, и её продвижение как на территории нашей страны, так и совместно с заинтересованными странами. Разработанная концепция предполагает решение проблемы полимерного мусора на основе природоподобных методов и технологий, прежде всего наиболее экономичных и безопасных из них. Она является результатом широкого обсуждения в профессиональной среде специалистов в области полимерного материаловедения и экологии.

Ключевые слова: загрязнение пластиком, полимерные отходы, загрязнение Мирового океана, захоронение отходов, мусоросжигательные заводы, механический рециклинг полимеров, химический рециклинг полимеров.

DOI: 10.31857/S0869587325070022, EDN: FHRKBA

Проблема утилизации полимерных отходов в последние десять лет превратилась в одну из самых обсуждаемых. К сожалению, сегодня дискуссии вокруг этой темы перешли в эмоциональную область, когда принимаются поспешные, необдуманные решения, нередко под влиянием массмедиа, которые публикуют снимки умирающих животных, ужасающие картины изуродованных прибрежных территорий

и отвратительных мусорных островов в мировом океане. Одновременно проводится активная кампания по воспитанию у населения полимифобии.

На этом фоне Программа ООН по окружающей среде (UNEP — United Nations Environment Programme) в качестве решения проблемы рассматривает ограничение выпуска полимеров, снижение их популярности и возвращение к “старым проверенным”

ЧВАЛУН Сергей Николаевич — член-корреспондент РАН, руководитель лаборатории функциональных полимерных структур ИСПМ РАН. ЩЕРБИНА Максим Анатольевич — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории функциональных полимерных структур ИСПМ РАН. БЫСТРОВА Александра Валерьевна — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории синтеза элементоорганических полимеров ИСПМ РАН. МУЗАФАРОВ Азиз Мансурович — академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории синтеза элементоорганических полимеров ИСПМ РАН.

средствам упаковки пищевых продуктов, таким как бумага и стекло. В декабре 2024 г. в г. Пусан (Южная Корея) прошёл очередной раунд переговоров по выработке международного обязывающего соглашения, в котором доминирует идеология отказа от выпуска и импорта части конструкционных и упаковочных полимерных материалов, а также добавок к ним. При этом в составе делегаций из разных стран практически нет представителей науки, которые помогли бы осознать, к чему приведут такие решения, оценить их последствия. В составе российской делегации в переговорах участвовал лишь один представитель научного сообщества из Академии наук, однако на последней сессии в Пусане не было и его.

Последнее, наряду с активной пропагандой в средствах массовой информации, особенно симптоматично, поскольку в предыдущие десятилетия мы стали свидетелями нескольких волн таких кампаний и их последствий: борьба с ДДТ, “озоновыми дырами”, истерия вокруг деятельности целлюлозно-бумажных комбинатов в позднем СССР, “углеродный след”, закрытие АЭС, “изменение климата”. Сегодня уже можно говорить о конечных выгодах приобретателях каждой из подобных кампаний.

Принимая столь важные решения, способные повлиять на промышленное развитие целых стран и регионов, на облик нашей планеты в целом, важно уметь, отключая эмоции, применять рациональный, научно обоснованный подход. В случае полимерных отходов это подразумевает максимально честный ответ на несколько вопросов. Необходимо оценить:

- масштаб проблемы, сопоставить её с природными процессами, которые могут повлиять на ситуацию;
- современные подходы к решению проблемы, определить их достоинства и недостатки;
- последствия отказа от полимерных материалов (чем их можно заменить, какова экологическая цена такой замены).

В Академии наук сложился важный инструмент взаимодействия науки и общества — научные советы, в работе которых участвуют ведущие профильные специалисты независимо от места их работы. В случае поставленной нами проблемы речь идёт о Научном совете по высокомолекулярным соединениям при Отделении химии и наук о материалах РАН (ОХНМ РАН), в задачу которого входит анализ состояния исследований в данной области в Российской Федерации и за рубежом, который разрабатывает прогнозы развития фундаментальных исследований по высокомолекулярным соединениям, определяет пути решения задач по профильным проблемам, готовит предложения по формированию новых федеральных целевых программ и включению в существующие программы новых проектов, рассматривает поручения Президиума РАН и Бюро ОХНМ РАН, разрабатывает рекомендации по этим

вопросам для вышестоящих организаций и заинтересованных ведомств.

После выступления автора статьи на заседании совета с докладом по состоянию дел в области полимерных отходов и загрязнения ими мирового океана решением совета была создана комиссия по разработке концепции — научному обоснованию возможных путей решения этой проблемы. В комиссию входят крупнейшие специалисты в области полимерных и композиционных материалов, представители крупных предприятий-производителей полимеров и полимерных изделий. Работу комиссии поддержали эксперты по логистике, международному праву, механике материалов, экономисты и океанологи. На организационном совещании сформирована рабочая группа, представленная авторами статьи.

МАСШТАБ ПРОБЛЕМЫ

К сожалению, вокруг полимерных материалов в обществе сформировалось несколько устойчивых экологических мифов, чрезвычайно далёких от действительности. Один из них касается преобладания полимеров в структуре твёрдых бытовых отходов. В таблице 1 приведены данные о структуре твёрдых отходов промышленности развитых стран.

Как видим, полимеры играют отнюдь не первую роль в отходах. Более того, согласно исследованию [1], доля полимерных материалов в структуре твёрдых бытовых отходов домашних хозяйств в развитых странах колеблется от 6% в хозяйствах с низкими доходами до 13% в хозяйствах с высокими доходами. Зависимость доли полимерных отходов от доходов хозяйств позволяет с уверенностью предположить, что в мире в целом доля полимерных материалов в структуре отходов ещё меньше.

Кроме того, необходимо понять, какова доля синтетических полимеров в общем объёме полимерных материалов (включая природные) на нашей планете. Природные полимеры включают в себя полисахариды (целлюлоза и хитин), белки, полиароматические смолы (лигнин) и другие и являются основой огромного многообразия уникальных композиционных материалов, активно используемых обитателями земли, в том числе людьми. Масштабы планетарного полимерного цикла не имеют аналогов. Пожалуй, единственное сопоставимое по масштабам явление — круговорот воды в природе. При этом вода меняет только своё агрегатное состояние, тогда как полимеры, являясь частью углеродного цикла Земли, претерпевают сложнейшие химические превращения, но каждый раз воспроизводятся в первозданном виде.

Ежегодно на земле образуется около 170 млрд тонн первичной биологической массы и приблизительно тот же объём разрушается [2] за счёт сжигания в лесных и степных пожарах, захоронения, а также

Таблица 1. Структура промышленных твёрдых отходов в развитых странах [1]

По материалам		По индустрии	
Шламы	44.3%	Традиционная энергетика	26.2%
Экскременты животных	20.9%	Сельское хозяйство, лесная промышленность	21.1%
Демонтаж зданий и сооружений	15.3%	Строительство	20.7%
Зола и сажа	4.2%	Производство бумаги	8.7%
Шлаки	3.6%	Производство металлов и металлических изделий	6.7%
Стекло, керамика, бетон	2.2%	Производство керамики и клеев	2.6%
Дерево	2.1%	Химическая промышленность	2.6%
Пластики	2.0%	Пищевая промышленность	2.4%
Металлы	1.8%	Добыча полезных ископаемых	2.0%
Минеральные масла	0.8%	Другое	7.1%
Другие отходы	3.0%		

вторичной переработки и других процессов. Бытует мнение, что природные полимеры легко разлагаются, однако это далеко не так: сваи из лиственницы, на которых стоит Венеция, до сих пор имеют хорошие эксплуатационные характеристики, несмотря на сотни лет присутствия в агрессивной среде, а шелуху от риса, которая не гниёт и которую даже сжигать необходимо в печах особой конструкции, тоже сложно отнести к легко резорбируемым материалам.

Что касается синтетических полимерных материалов, то с 1950-х годов в мире было произведено около 8.3 млрд тонн пластика, три четверти которого (чуть более 6 млрд т) сейчас представлено отходами [3], при этом лишь 9% пластикового мусора перерабатывается, 12% уничтожается, а остальные 79% накапливаются на свалках или в окружающей среде. Общее производство пластика выросло с 2 млн тонн в 1950 г. до более чем 400 млн тонн в начале 2020-х. В настоящее время оборот синтетических полимерных материалов составляет не более 0.25 % оборота природных. Важно отметить, что по большому счёту деление полимерных материалов на природные и синтетические само по себе является искусственным: и те и другие входят в общий (действительно, очень медленный) природный цикл, и синтетические материалы составляют только его малую часть.

Утверждение, что природа гораздо хуже справляется с синтетическими материалами, представляется нам ошибочным. Так, время жизни микрочастиц целлюлозы или чешуек хитина, панцирей моллюсков

чрезвычайно длительное, по своему воздействию на живые организмы они мало отличаются от микрочастиц синтетического полимера. Кроме того, человечество влияет на углеродный цикл планеты, извлекая из её недр и вводя в оборот значительные количества каменного угля (8.3 млрд т), нефти (4.5 млрд т) и газа (4 млрд м³), которые являются хранилищами углерода, природными “углеродными полигонами”. Производство полимерных материалов приводит к связыванию углерода, которое отчасти компенсирует (хоть и очень слабо, на уровне 3%) техногенное увеличение объёмов углеродного цикла.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Среди развитых на сегодня способов избавления от полимерных отходов относительно экологичными считаются сжигание, механическая и химическая вторичная переработка, но это дотационные социальные проекты. Они, с одной стороны, не несут коммерческой выгоды, а с другой — имеют ряд существенных экологических последствий.

Так, представленный в 2021 г. проект компании “РТ-Инвест” предполагал строительство 25 мусоросжигательных заводов общей стоимостью 1.3 трлн руб. (в среднем 52 млрд руб. на завод) [4]. Следует отметить, что, хотя представленный про-

ект был назван в правительстве “платиновым” (имея в виду его дороговизну), названная средняя стоимость мусоросжигательных заводов вполне конкурентоспособна. Так, средняя цена готового мусоросжигательного завода компании Hitachi Zosen INOVA в полной комплектации составляет около 1 млрд евро (100 млрд руб.). Бюджет российских предприятий предполагает выручку в 3.3 трлн руб. за 35 лет (94 млрд руб. в год, или 3.7 млрд на завод), из них около 100 млрд руб. — договоры о предоставлении мощности (срок действия 15 лет), 982 млрд руб. (33%) — затраты на электроэнергию, стоимость которой в условиях общего профицита энергии трудно назвать конкурентоспособной.

Субсидии из федерального и регионального бюджетов на строительство этих заводов должны составить более 320 млрд руб. (прямая бюджетная инвестиция на компенсацию капитальных затрат и субсидия процентной ставки по кредитам ВЭБ). Большая часть господдержки ожидалась на стадии строительства заводов — 295 млрд из 789 млрд руб. (около 40% затрат). Другие предполагаемые источники выручки: плата отходообразователей за утилизацию мусора (1255.9 млрд руб.), экологический сбор (837.7 млрд руб.), конкурентный отбор мощности (79.1 млрд руб.), доходы от продажи шлака (65.2 млрд руб.), то есть в основном предполагается трансфер экономической нагрузки в социальную. Можно заключить, что нынешняя финансовая модель проекта чрезвычайно сложно осуществима.

В качестве дополнительных проблем, связанных со сжиганием полимерных отходов, можно выделить:

- невозможность утилизации высокотоксичных материалов;
- значительный углеродный след (до 3.1 кг углекислого газа на 1 кг пластика);
- необходимость захоронения золы;
- высокие капитальные и операционные расходы на систему фильтрации, необходимые для купирования вредных газообразных выбросов в атмосферу.

Альтернативные методы утилизации полимерных отходов — механическая и глубокая химическая вторичная переработка. Рециклинг называют первичным, если в нём используют промышленные отходы полимеров (*pre-consumer*), и вторичным, если используют бытовые полимерные отходы (*post-consumer*) [5]. Процессы физического (механического) рециклинга включают дробление, промывку, разделение, сушку, реэкструзию и компаундирование полимеров без изменения их химической структуры. Развитие механической переработки (измельчение полимерных отходов с дальнейшим экструдированием и грануляцией) ограничено в связи с изменением химических и физических свойств переработанного материала по сравнению с их исходным аналогом. В результате доля вторично переработанного сырья в марочных полимерах

обычно не превышает 10–20%. Для механической переработки характерны трудности сертификации марок полимера [6], поэтому вторичный полимер, значительно уступая по соотношению цена—качество, практически всегда неконкурентоспособен.

Другим возможным подходом является очистка полимера при помощи растворителя, в таком случае свойства рециклизованного полимера аналогичны свойствам первичного полимера, но в каждом цикле очистки происходит потеря массы [7]. Кроме того, такое производство само по себе удорожается и становится неэкологичным. Существующие сейчас процессы химического рециклинга включают в себя два подхода: деполимеризацию и конверсию. Деполимеризация представляет собой получение мономеров и/или олигомеров из отходов полимеров. Конверсия представляет собой извлечение углеводородов, полученных из отходов полимеров на основе химических и термических процессов: каталитического крекинга, гидрирования, пиролиза, газификации [7].

Экономическая жизнеспособность различных технологий физического и химического рециклинга напрямую связана со стоимостью производства первичных полимеров [8]. Сырьё для первичных полимеров получают из натурального газа, нефти и, в меньшей степени, угля. Таким образом, рост цен на ископаемые ресурсы, в первую очередь нефть, позитивно влияет на экономическую жизнеспособность химического и физического рециклинга полимеров. Стоимость производства базовых первичных полимеров по данным 2019 г. лежит в интервале от 500 (полиэтилен высокой плотности) до 1 800 (поликарбонат) долларов США за тонну. Средняя стоимость вторичного производства методом механического рециклинга составляет до 90% стоимости первичного полимера, и поэтому вторичный полимер, значительно уступая по соотношению цена—качество, практически всегда неконкурентоспособен. Средняя стоимость механического рециклинга достигает 90% от цены первичного полимера, что делает вторичный материал малоконкурентоспособным из-за худшего соотношения цены и качества. Химический рециклинг обходится ещё дороже: деполимеризация до мономеров с последующей очисткой и полимеризацией — около 1600 \$/т; конверсия до углеводородов с дальнейшей переработкой — до 2200 \$/т. При этом цена рециклизованного полимера составляет в среднем 2100 \$/т [9]. Следует учитывать, что затраты на переработку варьируются в зависимости от региона и типа полимера. Однако в любом случае химический рециклинг в 1.4–1.9 раза дороже производства первичных аналогов [9].

Чтобы конкретная технология рециклинга была экономически жизнеспособна, сумма капитальных затрат (*CAPEX*) и операционных расходов (*OPEX*) не должна превосходить рыночную стоимость продукта. Данные о расходах для отдельных технологий рециклинга приведены в таблице 2.

Таблица 2. Капитальные и операционные расходы для некоторых технологий рециклинга полимерных отходов, 2018–2020 гг. [7,10–13]

Способ рециклинга	Отходы	Мощность, тонн/год	CAPEX, € за тонну	OPEX, € за тонну	CAPEX + OPEX, € за тонну
Растворение	Пенополистирол	11.2	190	489	679
Гликолиз	Полиэтилентерефталат	22.3	94	560	654
Метанолиз	Полиэтилентерефталат	77.0	147	473	620
Пиролиз	Смешанные полимерные отходы	—	—	—	193
Газификация	Смешанные полимерные отходы	122.0	187	31	218

Как видно из таблицы, все существующие технологии рециклинга являются убыточными по сравнению с производством первичного полимера. Гликолиз жизнеспособен только в случае низких цен на сырьё. Другие рассмотренные способы рециклинга требуют государственного финансирования: согласно [8], уровень поддержки до достижения положительных значений чистой прибыли для предприятия-переработчика полимерных отходов в Евросоюзе составляет порядка 63 € за тонну для метанолиза отходов полиэтилентерефталата, 160 € за тонну для пиролиза и 357 € за тонну для газификации отходов.

Таким образом, и сжигание, и те или иные виды рециклинга не позволяют решить проблему полимерных отходов в масштабе планеты, а значит, необходимо искать новые, усовершенствованные способы их утилизации. Как уже было отмечено выше, главным аргументом при выборе магистрального пути в данном случае является тот факт, что цивилизация всё активнее вмешивается в распределение долей природной триады утилизации полимерных материалов (захоронение, вторичное использование, сжигание) путём сжигания значительных объёмов ископаемого топлива. На наш взгляд, выбор в пользу захоронения имеет фундаментальную основу, что противоречит эмоционально окрашенному субъективному подходу, положенному в основу современных предпочтений западной цивилизации. Именно захоронение позволяет минимизировать вмешательство человека в природные процессы. Лимит на сжигание, отпущенный человечеству, быстро исчерпывается, в то время как захоронение — это метод восстановления материального баланса.

ВОЗМОЖЕН ЛИ ОТКАЗ ОТ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ?

Ещё один миф — предположение, что полимеры являются роскошью, от которой очень просто отказаться. Но зададимся вопросом, возможен ли вообще современный мир без полимерных материалов?

Наш главный тезис состоит в том, что в структуре быта человека XXI столетия есть несколько ниш, где полимерные материалы незаменимы: это упаковка, строительные материалы, медицина, одежда, изоляция.

Например, в программе UNEP “Новая экономика пластмасс” [14] участвует 150 крупных компаний, производящих упаковку. Однако только пятая часть, 31 компания, раскрыла данные о ежегодном производстве пластмассовых изделий. Среди них “Indorama Ventures PLC” (6 млн т в год), “Nestlé” (1.7 млн т в год), “Danone S.A.” (0.75 млн т в год), “Tetra Pak” (0.72 млн т в год) [15]. Общий ежегодный объём производства полимерной упаковки оценивается в 60 млн т. Его замена на бумажную потребует производства более 100 млн т бумаги, то есть нужно будет увеличить её производство в мире как минимум на четверть. В то же время на протяжении всего жизненного цикла полимерный пакет обеспечивает как минимум вдвое меньший уровень выбросов парниковых газов по сравнению с его бумажным аналогом. Для его производства требуется в 17 раз меньше воды, в 1.5 раза ископаемого топлива и в 3.4 раза энергии. Только в России использование пластиковых пакетов помогает предотвратить ежегодно вырубку 15 млн деревьев, которые поглощают 14 тыс. т углекислого газа в год [16].

При производстве тарных бутылок только “The Coca-Cola Company” производит 3 млн т полимерных бутылок в год, замена которых потребует производства как минимум 30 млн т тарного стекла [15]. Отметим, что сегодня всё производство тарного стекла в России составляет менее 7 млн т [17], а в мире его производство оценивается в 63 млн т в год. То есть только отказ от полимерных бутылок одной компании должен привести к увеличению энергоёмкого производства тарного стекла в 1.5 раза, общее же увеличение выпуска тарного стекла, по нашим оценкам, должно составить 10–11 раз — заведомо недостижимая и экологически опасная цель. Следует учитывать, что углеродный след ПЭТФ составляет 2.3 кг CO₂ на килограмм полимера, а стек-

ла — 0.6 кг CO₂ на килограмм материала [18]. Однако поскольку стеклянная бутылка примерно в 10 раз тяжелее полимерной, она как минимум в 2.5 раза менее экологична. Важно понимать, что развитие полимерной упаковки, а также более сложных многослойных упаковочных материалов (например, “Tetra Pak”) позволило существенно увеличить срок хранения пищевых продуктов, что сделало их более доступными, а значит, они вносят значительный вклад в решение проблем голода и бедности (цель 3 ООН в области устойчивого развития [19]).

Нельзя не сказать о влиянии полимеров на продукцию текстильной промышленности и производство одежды в целом. Так, в индексе Higg, разработанном международным объединением участников швейной промышленности “Sustainable Apparel Coalition” [20], шёлк занимает второе после натуральной кожи место по негативному воздействию на окружающую среду. Согласно этому рейтингу, его влияние значительно превосходит влияние вискозы почти по всем параметрам, включая глобальное потепление, истощение природных запасов, загрязнение водоёмов. Хлопковое волокно получают из хлопчатника. Это растение, которому нужно очень много воды. 69% так называемого водного следа в производстве текстиля составляет именно выращивание хлопчатника. Другая проблема хлопководства — гигантские объёмы химикатов для борьбы с вредителями и болезнями. На отрасль приходится 16% всех используемых в мире пестицидов. Однако первое место по негативному влиянию на окружающую среду занимает натуральная кожа. Её производство включает не только чрезвычайно высокую экологическую нагрузку животноводства, но и крайне токсичный этап дубления, в котором используются хром, свинец и мышьяк.

Важно понимать, что удовлетворить потребности растущего населения Земли исключительно за счёт природных ресурсов невозможно. Это привело бы к колоссальному увеличению потребления древесины, кожи, хлопка, льна и шёлка, производство которых требует значительных площадей и ресурсов, а также является экологически грязным. Точные расчёты объёмов текстильного производства требуют отдельного исследования, но уже очевидно: отказ от синтетических аналогов повлёл бы за собой кратное — и практически неосуществимое — наращивание выпуска натуральных материалов.

Отдельно отметим проблему производства обуви. До середины XIX в. всю обувь производили из кожи (для высших и средних слоёв населения) или дерева (для бедных). Сегодня население Земли стало как минимум в 8 раз больше, и каждый не довольствуется одной-двумя парами обуви, как раньше. Более того, замена широкого ассортимента современной продукции кожой (например, при производстве кроссовок, резиновых тапочек и пр.) представляется просто невозможной.

В современном строительстве полимерные материалы являются незаменимым сырьём для производства тепло- и электроизоляции, труб и т.д. Полимерные трубы в 5–10 раз более лёгкие, чем их металлические аналоги, химически стойкие, гораздо более гигиеничные и простые для замены. Обратный переход на металлы не только не решит экологические проблемы, но наоборот — существенно их усугубит, поскольку производство металлов гораздо менее экологично, требует больше энергии, а также ставит перед человечеством и без того достаточно острую проблему быстрого истощения запасов металлических руд.

Особого внимания заслуживает использование полимерных изделий в медицине. Полимерные шприцы, наверное, можно заменить стеклом, вернувшись к середине XX в., однако это потребует и соответствующего отката в регламентах безопасности — ведь использование одноразовых шприцев позволило значительно повысить безопасность пациентов. Стенты и медицинские трубки, мочеприёмники, суставные протезы и эндопротезы для герниопластики, материалы для стернотомии позволяют продлить жизнь большого количества пациентов и улучшать качество жизни ещё большего их числа.

Итак, никакой реальной альтернативы синтетическим полимерным материалам без значительного, в разы, снижения уровня жизни населения нет, более того, производство полимеров необходимо увеличивать. Оптимизация уровней производства и потребления в сегодняшнем мире, несомненно, требует существенного вклада полимерной продукции.

НАЦИОНАЛЬНАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ И ОЧИСТКИ МИРОВОГО ОКЕАНА

Полученные выводы привели нас к пониманию необходимости создания независимой национальной концепции утилизации полимерных отходов — научно обоснованного документа, в котором не копировались бы нарративы и видение других стран, а творчески развивались бы новые подходы, которые, с одной стороны, позволили бы предотвратить загрязнение нашей планеты, с другой — не ограничивали бы развитие человечества под предлогом узко понимаемой зелёной повестки.

Концепция имеет двухуровневую структуру. Её фасад — это десятистраничный документ, включающий семь разделов, лёгкий для понимания; в нём тезисно изложены основные вопросы. Дополнительно к каждому разделу подготовлена аргументационная часть, которая содержит основные расчёты и статистические данные. Перечислим семь разделов Концепции.

1. Актуальность проблемы, развёрнуто изложенная в настоящей статье.

2. Критика существующих подходов, навязываемых мировому сообществу.

3. Природная триада утилизации полимерных материалов.

4. В чём заключается природоподобие? Показано, что захоронение в океане — оптимальный вариант утилизации полимерных отходов. Минимальная предварительная обработка (сбор, автоматическая сортировка от ценных примесей — металлы, стекло), компактизация, упаковка, захоронение в океане на заранее выбранных площадках для строительства искусственных полимерных островов — вот основные этапы процесса. В результате происходит восполнение баланса по углероду, нарушенного цивилизацией при сжигании всё возрастающих объёмов ископаемого топлива. Такая версия захоронения полимерных отходов — наиболее эффективный вариант поддержания углеродного баланса на планете, причём полимеры становятся самым действенным инструментом в этом глобальном процессе. Основная аргументация включает в себя следующие пункты:

- площадь морского дна больше площади суши; средняя глубина мирового океана позволяет создать компактные хранилища, не превышающие по своим размерам малых долей процента общей поверхности, в концепции приведены конкретные цифры — сравнение, каких котлованов потребовало бы захоронение на суше;

- основные факторы и результаты воздействия на полимерные отходы на поверхности океана (механическое воздействие — трение под действием колебаний поверхности воды, образование микропластика, окисление кислородом воздуха, фотодеструкция) в глубине уменьшаются в разы или на порядки;

- температура океанских глубин составляет 3°C в отличие от средней температуры поверхности мусорных островов 30°C; поскольку, по законам химической кинетики, уменьшение температуры экспоненциально замедляет скорость реакций, деструкция полимерных материалов замедляется как минимум в 10 раз;

- отсутствие механического воздействия, перемешивания и обновления поверхности, а также механохимической активации замедляет скорость гетерогенных процессов в десятки раз;

- концентрация кислорода на поверхности (то есть кислорода в воздухе) и в толще океанской воды отличается на несколько порядков, поэтому реакции окисления, столь важные на поверхности воды, становятся пренебрежимо малым фактором на дне океана;

- на дне отсутствует УФ-радиация, поэтому скорость радикальных процессов деструкции падает до нуля.

Полимерные материалы, которые предполагается захоранивать на дне океана, сегодня уже нахо-

дятся в океане. Поэтому предлагаемая концепция не противоречит Лондонской конвенции по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов 1972 г. и протоколу к ней 1996 г. Речь идёт о минимизации факторов, приводящих к нежелательным реакциям в полимерном мусоре. В Концепции имеет место не слепое копирование природных процессов, а научно обоснованный выбор правильных соотношений в природной триаде утилизации полимеров, с тем чтобы не усугублять негативное воздействие цивилизации на природу, а минимизировать его. Активное захоронение (захоронение, совмещённое со вторичным использованием) направлено на минимизацию сжигания природных и синтетических полимеров и тем самым на снижение давления на окружающую среду. Таким образом, один вид цивилизационного воздействия на окружающую среду снижает негативные эффекты от другого вида цивилизационного воздействия.

5. В качестве пилотного проекта решения острой проблемы загрязнения океана предложена программа “Полимерные острова”, которая обеспечит очистку океана и организацию цивилизованного, безопасного и экономически эффективного захоронения полимерных отходов на площади менее тысячной доли площади мирового океана (площадь мирового океана составляет 361 млн км² — площадь большого тихоокеанского мусорного острова от 700 тыс. до 1.5 млн км², а площадь полимерных островов, аккумулирующих все накопленные пластиковые отходы, не превысит 100 км²). Перемещение полимерных отходов с поверхности океана на океанское дно коренным образом изменит сохранность полимерных материалов за счёт ликвидации основных факторов деструкции и исключит последующее диспергирование опасных соединений по поверхности и в толще океанских глубин.

Описанная нами проблема имеет выраженный междисциплинарный характер, поэтому при подготовке программы к её разработке, помимо научных советов по высокомолекулярным соединениям и по глобальным экологическим проблемам, необходимо привлечь специалистов в области механики, авиастроения, океанологии, морской логистики, представителей крупнейших полимерных компаний страны.

6. Международные аспекты. Совершенно очевидно, что после подготовки абрисного проекта программы к её дальнейшей разработке необходимо привлекать международное сообщество: мусорные острова расположены главным образом в международных водах. Понадобятся международные соглашения по статусу новых территорий, условий реализации и функционирования проекта. Наиболее перспективным представляется международное управление под эгидой БРИКС. Глобальный объединяющий характер проекта, его успешная реализация приведут к зримому улучшению “экологи-

ческого климата” на планете, повысят авторитет и популярность БРИКС, станут успешным примером позитивного и результативного международного сотрудничества. Программа проекта может быть подготовлена и согласована к очередному председательству РФ в БРИКС ориентировочно в 2029 г.

7. Использование Концепции. Концепция носит рекомендательный характер и после утверждения Президиумом РАН может быть использована в качестве основы для выработки государственной политики в области переработки полимерных отходов, пропаганды бережного отношения к полимерам, полимерным отходам как к одному из важнейших инструментов решения многих острых проблем существования человеческого сообщества.

Концепция переработки полимерных отходов и очистки Мирового океана была всесторонне обсуждена на Научном совете по высокомолекулярным соединениям Отделения химии и наук о материалах РАН и получила его официальное одобрение, после этого она была утверждена на заседании бюро ОХНМ РАН и рекомендована для представления Президиуму РАН. Концепция прошла апробацию на ряде крупных профильных конференций, включая XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии в 2024 г. Следует отметить, что создание концепции – важный пример модус операнди Академии наук, когда общественно значимая проблема сначала получает внимание специалистов, которые в рамках профильной структуры создают работающий инструмент её решения, а затем обсуждается на всё более высоких уровнях. Организационные аспекты очень важны для активизации работы научных советов РАН на инициативной основе, в отсутствие директивных указаний сверху.

* * *

Сегодня проблема полимерных отходов приобрела глобальное измерение. Подготовленный в рамках UNEP проект международного соглашения не будет содействовать её решению, более того, значительно усугубит экологическую ситуацию в мире, приведёт к существенному снижению уровня жизни, в первую очередь в развивающихся странах, в которых отсутствует индустриальная полимерная инфраструктура. Причина такого положения вещей – игнорирование научной экспертизы при подготовке соглашения. Российская Федерация должна в срочном порядке приостановить переговоры в рамках UNEP до выработки национальной стратегии развития полимерной промышленности, включая концепцию переработки полимерных отходов. Разработанная рабочей группой на базе Совета по высокомолекулярным соединениям ОХНМ РАН концепция представляет собой пример такого документа. Не отрицая другие принятые к сегодняшнему дню подходы к переработке полимерных отходов, она предлагает совершенно новые,

гораздо более эффективные решения, которые будут способствовать значительному улучшению экологической ситуации на планете.

ЛИТЕРАТУРА

1. An introduction to plastic recycling // Plastic Waste Management Institute, 2022.
2. Общая биология: Учебное пособие для 11-го класса. § 45. Биосфера и её структура. М.: Просвещение, 2022.
General Biology: Textbook for the 11th grade. § 45. The biosphere and its structure. Moscow: Education, 2022. (In Russ.)
3. Geyer R., Jambeck J.R., Lavender K. Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. 2017, vol. 3, no. 7, e1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782
4. <https://www.rbc.ru/business/26/03/2021/605c50f79a794729fde26282>
5. Kishanov K. et al. Recent Developments and Perspectives of Recycled Poly(ethylene terephthalate)-Based Membranes: a Review // Membranes. 2022, vol. 12, no. 12 (11), p. 1105. <https://doi.org/10.3390/membranes12111105>
6. Ла Мантия Ф. Вторичная переработка пластмасс. СПб.: Профессия, 2006.
La Mantia F. Recycling of plastics. St. Petersburg: Profession, 2006.
7. Werner M. et al. Closing the Plastics Circularity Gap Full Report. 2022. Google/AFARA Report
8. Garcia-Gutierrez P., Amadei A.M., Klenert D. et al. Environmental and economic assessment of plastic waste recycling A comparison of mechanical, physical, chemical recycling and energy recovery of plastic waste, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023. DOI: 10.2760/0472, JRC132067.
9. IHS Markit. The IHS Markit View of the Energy Future for Rivalry, Autonomy, and Discord (2020–2050). 2020.
10. Carducci N., Hoglund A., Lube M., Murdock D. Mixed Plastic Recycling Plant. 2020.
11. Faraca G., Martinez-Sanchez V., Astrup T.F. (2019). Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres // Resources, Conservation and Recycling. 2019, no. 143, pp. 299–309.
12. Chemical Recycling of Plastic Packaging Materials – Analysis and opportunities for upscaling. Netherlands Institute for Sustainable Packaging (KIDV), 2018.
13. Stapf D., Wexler M., Seifert H. Thermal Processes for Feedstock Recycling of Plastics Waste // Report to BKV and PlasticsEurope. 2018, november, pp. 1–68.
14. <https://www.unep.org/ru/globalnaya-obyazatelstvovaya-ekonomika-plastmass>

15. <https://emf.thirdlight.com/file/24/K6L0nIrK6TiV5CaK63uPKX6taWr/The%20Global%20Commitment%202023%20Progress%20Report.pdf>
16. Российский экологический оператор. <https://green.reo.ru/howto/tpost/bmsccy5dr1-modnii-bumazhnii-ili-grustnii-plastikovi>
Russian environmental operator. <https://green.reo.ru/howto/tpost/bmsccy5dr1-modnii-bumazhnii-ili-grustnii-plastikovi> (In Russ.)
17. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 5-2022 “Производство стекла” (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2022 г. № 3159). <https://base.garant.ru/406092259/1cafb24d049dcd1e7707a22d98e9858f/>
18. <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>
19. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/>
20. <https://cascale.org/>

CONCEPT FOR SOLVING THE PROBLEM OF POLYMER WASTE AND CLEANING THE WORLD OCEAN

S.N. Chvalun^{a,*}, M.A. Shcherbina^{a,}, A.V. Bystrova^{a,***}, A.M. Muzafarov^{a,****}**

^aEnikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: serge@ispm.ru*

***E-mail: max-shcherbina@yandex.ru*

****E-mail: bystrova@ispm.ru*

*****E-mail: aziz@ispm.ru*

Plastic pollution of the World ocean is a pressing problem of the international level. According to the most conservative estimates, millions of tons of plastic are dumped into the ocean every year, and the area of the Great Pacific Patch is 1.5 million square kilometers.

Unfortunately, today the international community is being forced to adopt approaches to solving this problem that have no serious scientific basis and are deeply contradictory in their basis. The essence of the measures proposed by developed countries is to fix the current state of affairs, in which a small circle of countries has developed industry and technology (including the production of a wide range of polymeric materials), while for the rest of the world such development is artificially restrained for environmental reasons.

The only way out of this situation was the development of a systemic, sovereign concept of the Russian Academy of Sciences aimed at solving the problem of polymer waste, and its further promotion both on the territory of our country and jointly with interested countries. The developed Concept assumes solving the problem of polymer waste using nature-like methods and technologies, choosing the most economical and safe of them. It is the result of a broad discussion in the professional community of specialists in the field of polymer materials science and ecology.

Keywords: plastic pollution, polymer waste, ocean pollution, waste disposal, waste incineration plants, mechanical recycling of polymers, chemical recycling of polymers.