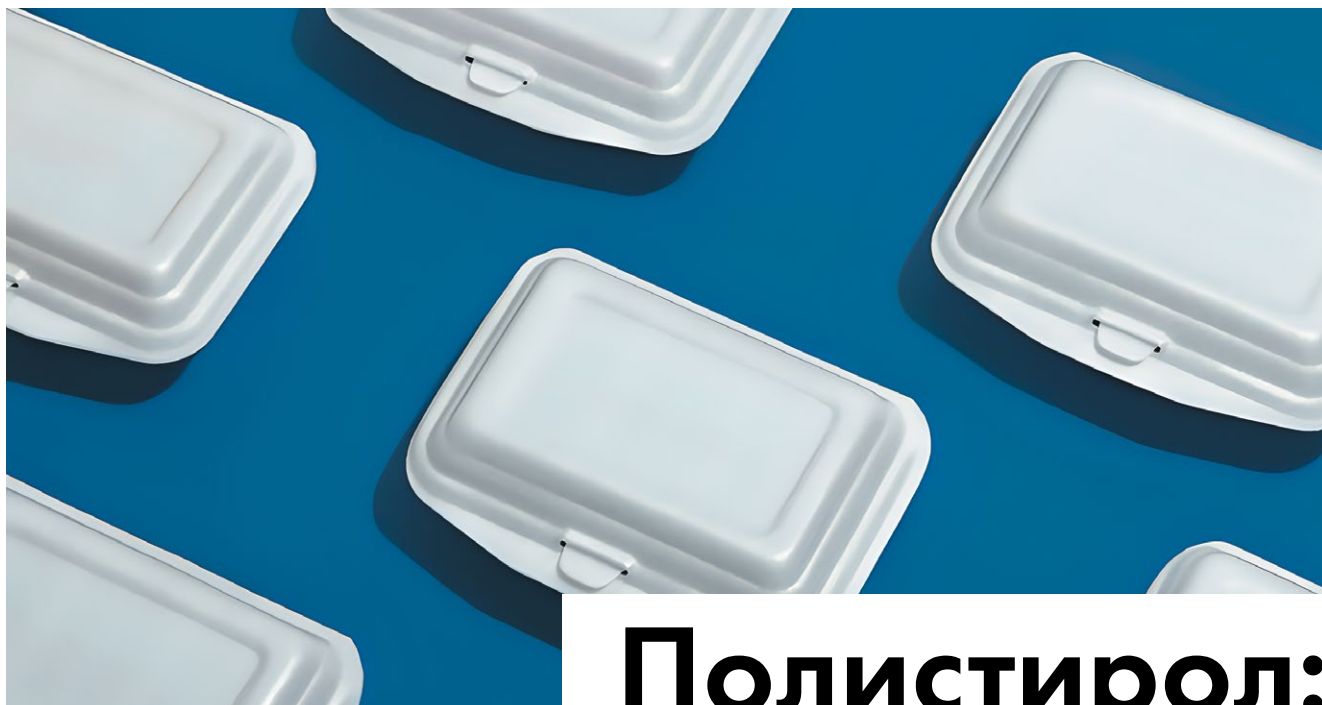




Полистирол: уникальный и перспективный

Эксперт журнала приводит аргументы, развенчивающие миф о полистироле как вредном и не перерабатываемом вторично пластике. Все оказывается с точностью до наоборот: полимер обладает уникальными потребительскими свойствами, и может успешно рециклироваться всеми известными способами

Павел КОЛЕСНИКОВ,
заместитель генерального
директора по науке
и инновационной деятельности
компании «Мультипак»
(Республика Беларусь)



Побудительным мотивом появления настоящей статьи стало обретшее силу мейнстрима представление о полистироле как о «неперерабатываемом» или «трудно перерабатываемом» материале. Даже уважаемые организации, отвечающие за экологическую повестку, на своих сайтах пишут о том, что твердый полистирол нельзя ни собрать, ни переработать, что срок его жизни — 2 цикла, что это материал с посредственными механическими свойствами и что полистирол вреден вследствие выделений стирола (забегая вперед, следует сразу сказать, что это абсолютно не так, недавно подтвердило Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA)).

Многие из этих утверждений написаны 10 и более лет назад, но наука и технологический прогресс не стоят на месте. К сегодняшнему дню известные методы переработки полистирола были усовершенствованы, возникли и коммерциализированы новые технологии. В результате

мы видим все возрастающий интерес к данному материалу, и для многих профессионалов доказанная пригодность полистирола к успешной многократной вторичной переработке стала настоящим открытием.

В этой статье автор не будет останавливаться на инициативах и достижениях российских компаний «Технониколь», «СИБУР», «Пеноплекс» и других в сфере переработки полистирольных отходов: это тема для отдельного исследования. Задача данной статьи — рассказать, что, кроме механического рециклинга полистирола, существуют другие, уже коммерциализированные способы переработки полимеров. И предваряя этот рассказ, упомянем высказывание Франка Айзенбергера, директора производства полистирола EMEA в компании INEOS Styrolution: «Полистирол проще, быстрее и экономичнее перерабатывать, чем другие полимеры».

Жив и не хочет сдаваться

Кто только не кидал в него камни! Его включали в пресловутые списки «28» и «23» в России; к 2025 году он должен исчезнуть из сферы упаковки в Европе по требованию фонда Эллен Маккар-

тур и в США в связи с попаданием в список нежелательных материалов, составляемый организацией U.S. Plastics Pact. Но он уже более 90 лет жив и в последние годы считается в мире поистине уникальным материалом с огромным, непрерывно растущим потенциалом для сбора, сортировки и последующей переработки.

С момента своего изобретения полистирол — универсальный аморфный полимер — за более чем 90 лет официального существования, непрерывно совершенствуясь, обрел широкий спектр применений, включая использование в качестве теплоизоляции в строительстве, материала для корпусов холодильников, защитной упаковки для бытовых и промышленных приборов, упаковки для свежей рыбы, молочных продуктов и мяса, а совсем недавно, в период COVID-19, оказался востребованным в качестве защитной упаковки для вакцин. И твердый, и вспененный полистирол как безопасные упаковочные материалы давности неотъемлемой частью жизни современных людей.

Годом создания полистирола считается 1931, когда череда патентов, исследовательские работы по совершенствованию рецептурной формулы заложили основы для промышленного производства и привели к старту полноценного выпуска полимера. Справедливости ради необходимо отметить, что на самом деле первое упоминание о полистироле появилось почти сто лет назад, когда в 1839 году немецкий фармацевт Эдуард Симон невольно впервые открыл полистирол, выделив вещество из коры дерева стиракс. А первая реакция полимеризации стирола была осуществлена в 1910 году российскими учеными.

Но при всех своих преимуществах полистирол в настоящее время переживает серьезный кризис общественного имиджа. В результате дезинформации, распространяемой разного рода псевдоэкологами и негосударственными фондами, борющимися за так называемую зеленую повестку, был создан и продолжает распространяться миф о трудности или невозможности переработки полистирола, а контейнеры для пищевых продуктов из этого материала продолжают запрещать в ряде стран из-за якобы негативного влияния на окружающую среду. Твердый полистирол подвергался гонениям, однако ураган обвинений в неэкологичности

и невозможности рециклинга обрушился именно на вспененный полистирол и особенно на пищевую упаковку из ПС.

Так обстояло дело несколько лет назад. Но с 2021 года отношение к полистиролу в мире начинает меняться. Постепенно полистирол начинает приобретать статус востребованного в сфере вторичной переработки полимера. Сегодня в мире никто, кроме неадекватных псевдоэкологов, уже не говорит о запрете твердого полистирола, в том числе в пищевой упаковке, или об отказе от применения. Однако, запрет ЕС на использование вспененного ПС в пищевой упаковке, например лотков для яиц, все же вступил в силу с 1 января 2025 года.

Тем не менее Франция объявила, что ни вспененный, ни твердый полистирол запрещать не будет. Более того, Франция одной из первых в ЕС строит полноценный, а не пилотный завод по переработке вспененного, а значит, и твердого полистиролов.

Несмотря на все преграды, интерес к этому в мире материалу растет, о чем свидетельствуют прогнозы агентства Research and Markets, касающиеся роста глобального рынка полистирола и стирольных пластиков, а также инвестиций в сектор производства и переработки полистирола (рис. 1, 2, 3).

Набор потрясающих свойств

Чем же может быть привлекателен полистирол для владельцев брендов, использующих жесткую упаковку для своих товаров, несмотря на многочисленные попытки очернить материал и создать вокруг него негативную ауру?

Во-первых, полистирол совершенствовался многие годы, даже десятилетия, и наконец был признан безопасным упаковочным материалом для хранения мясных и молочных продуктов, а также фруктов. Упаковка из полистирола способна высвобождать углекислый газ, что делает ее идеальным выбором для таких молочных продуктов, как пахта или кефир, йогурты, которые даже после упаковки продолжают выделять углекислый газ. Упаковка пропускает CO₂ из контейнера наружу, но не пропускает кислород

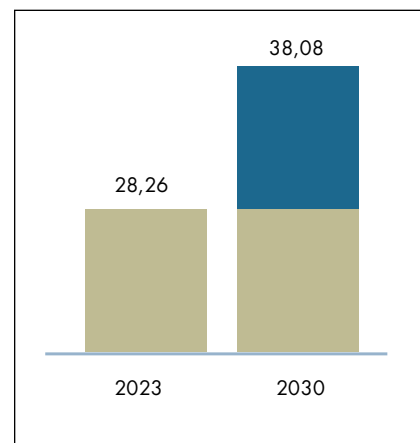


Рисунок 1. Прогнозируемый среднегодовой темп роста мирового рынка ПС к 2030 году, млрд долларов США

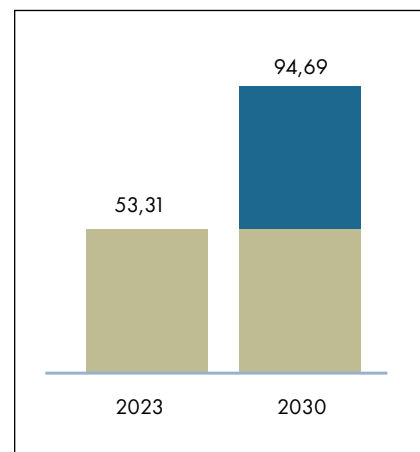
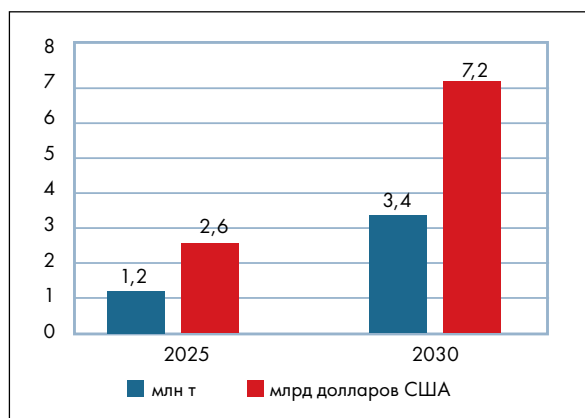


Рисунок 2. Прогнозируемый среднегодовой темп роста мирового рынка полимеров на основе стирола к 2030 году, млрд долларов США

Рост производства ПС и объем инвестиций в развитие сектора, млн т и млрд долларов США





внутри, что обеспечивает длительность срока хранения продукта.

Во-вторых, полистирол проще, быстрее и экономичнее обрабатывать, чем другие полимеры. Для получения той же степени прочности и жесткости требуется меньше материала по сравнению с другими полимерами — так считает Франк Айзенрегер, директор по устойчивому развитию компании INEOS Styrolution.

Полистирол демонстрирует модуль упругости 2000 МПа и выше, в то время как ПЭТ может похвастаться значением не более 1700 МПа. Это означает, что при одинаковой толщине куполов тортиц, изготовленных из ПЭТ и ПС, количество тортиц с вложенными тортами, которые может выдержать нижняя тортица, если на нее поставить все упомянутые тортицы, для ПЭТ будет равно 4-5, в то время как для полистирола — 6-7. При этом необходимо учесть, что, поскольку плотность полистирола меньше плотности ПЭТ почти на 30%, то, соответственно, и давление на окружающую среду, которое будет оказывать пластик, будет меньше. Данная проверка проводится по требованию фирм-покупателей упаковки для расчета логистики поставок и вариантов хранения своей продукции.

В-третьих, благодаря своей аморфной структуре полистирол обеспечивает широкий диапазон технологических возможностей как для экструзии, так и для термоформования. Это означает, что настройки температуры и скорости могут меняться в процессе производства, поэтому вероятность брака и появления сверхнормативных отходов меньше по сравнению с другими полимерами.

В-четвертых, при использовании сложных multifunctional формовочно-фасовочно-укупорочных машин скорость переработки полистирола на

20-30% выше, чем при работе с другими полимерами.

В-пятых, ПС выдерживает несколько циклов переработки (не 2, а 4-5), сохраняя при этом превосходные механические свойства.

В-шестых, полистирол — один из прекрасно сортируемых пластиков, поскольку обладает уникальными сигнальными свойствами, которые позволяют легко и точно осуществлять автоматизированную сортировку. А благодаря последним технологическим достижениям полистирол стал одним из самых универсальных продуктов замкнутого цикла, о чем многие конечные потребители не знают. Потенциал полистирола как объекта вторичной переработки трудно переоценить. ПС — единственный полимер, который может быть вторично переработан любым известным на сегодня способом, а на выходе получается вторичный материал, не уступающий первичному в отношении характеристик. Вот что, например, говорит об этом Мэтт Сихолм, президент и исполнительный директор PLASTICS (Ассоциация производителей и переработчиков пластмасс США): «Полистирол по своей природе создан для вторичной переработки, перерабатывается сегодня и будет перерабатываться в будущем в гораздо больших масштабах. Переработка полистирола реальна и сейчас в сборе полистирола (стаканчики, лотки, пенопласт) участвует 105 млн американцев, и мы гордимся тем, что, реализуя эту инициативу в PLASTICS, присоединились к целостной цепочке создания стоимости для совместной работы, направленной на повышение экологической устойчивости данного пластика».

Механический рециклинг

Немецкий Институт Фраунхофера (Fraunhofer IVV) совместно с консорциумом Styrenic Circular Solutions (SCS объединяет всех крупных производителей полистирола и пластиков на его основе: Trinseo, INEOS Styrolution, ENI, Total, а также производителей оборудования для его переработки и разработчиков технологий переработки полистирола) разработал две высокоэффективные технологии суперочистки для механического метода рециклинга полистирола, обеспечивающий чистоту вторичного полистирола 99,9%.

Это позволило SCS получить сертификат от Европейского управления по безопасности пищевых продуктов (EFSA) на допуск вторичного полистирола (rПС) для



изготовления упаковки, контактирующей с пищевыми продуктами. Например, стаканчики для йогуртов в COEXPAN, подразделения жесткой упаковки Grupo Lantero, и на заводах Greiner Packaging изготавливаются полностью из 100% вторичного полистирола, полученного по одной из упомянутых выше технологий механического рециклинга.

По утверждению Йенса Катманна, генерального секретаря SCS, и руководителя норвежской компании TOMRA Systems, глобального производителя оборудования для сортировки и рециклинга, лотки, как и другую упаковку из вспененного полистирола, также можно эффективно и действенно разделять и сортировать с помощью существующих технологий.

Например, производитель упаковки Magic Pack, входящий в ProFood Italy, интегрировал вторичный полистирол в новые вспененные пищевые лотки, добавив 62,5% вторичного ПС в функциональный средний слой B, составляющий 80% от общей массы в структуре A/B/A. Внешние слои A (каждый по 10% от общей массы) — это слои первичного твердого полистирола. Таким образом, лотки из вспененного полистирола от Magic Pack содержат 50% вторичного гПС, на 100% пригодны для вторичной переработки и могут быть переработаны многократно.

«Это решение стало доказательством того, что пищевые лотки из полистирола, как твердые, так и вспененные, можно сортировать, перерабатывать и превращать в материалы, контактирующие с пищевыми продуктами, и этот опыт должен вдохновить многих на ускоренное масштабирование метода», — говорят в компании TOMRA Systems.

Растворение в сольвенте

Технология очистки полистирола посредством растворения в специально приготовленном сольвенте появилась относительно недавно — около 10 лет назад и сейчас в рамках этого метода существует несколько способов очистки полистирола и других пластиков, разработанных разными компаниями.

Во время переработки растворением в сольвенте пластик претерпевает физические, а не химические изменения, и поскольку молекулярные цепочки остаются нетронутыми, то после очистки от примесей до степени чистоты 99,8%, полимер может быть извлечен из раствора и



заново использован для создания новых продуктов.

Свои методы для процессов рециклинга растворением в сольвенте созданы компаниями CreaCycle (Германия) — метод CreoSolv® разработан при участии Института Фраунхофера — и Polystyvert (Канада).

Запатентованный компанией Polystyvert метод растворения пластиковых отходов с последующим извлечением чистого полистирола базируется на том, что отходы в твердой форме растворяются в сольвенте на основе эфирного масла. После растворения можно отделить загрязняющие вещества и добавки. Технология очистки дает возможность перерабатывать все типы исходного сырья от промышленных до постпотребительских отходов. В результате обеспечивается удаление широкого спектра растворимых и нерастворимых загрязняющих веществ, таких как, например, пигменты или бромированные антипирены. После удаления примесей можно окончательно выделить исходный полимер из растворителя.

Конечный продукт представляет собой очищенный полимер, который гранулируется и представляет собой полистирол, не уступающий по качеству первичному. Этот вторичный ПС высокой чистоты может быть повторно использован для производства изделий, в том числе для упаковки пищевых продуктов.

Учитывая, что в рамках данного метода раствор не модифицирует полимер и молекулярные цепочки охраняются, полистирол, как вспененный, так и твердый, можно перерабатывать бесконечное количество раз без потери качества материала, а очищенный растворитель (эфирное масло) использовать многократно.





Деполимеризация

Бельгийский специалист по управлению отходами Indaver производит стирольный мономер из отходов потребления на своем заводе по деполимеризации с 2017 года. Завод Indaver, расположенный в порту Антверпена (Бельгия), сортирует потоки пластика, которые невозможно переработать методами высококачественного механического рециклинга. Материалы, высвобождаемые по технологии Indaver, являются основным сырьем, которое по своим параметрам эквивалентно материалам, извлекаемым из ископаемых потоков (нефти или газа).

Полученный в результате высококачественный стирольный мономер позволяет таким производителям полимеров, как INEOS Styrolution, заменить ископаемое сырье при производстве полистирольных пластиков. В результате след CO_2 меньше, чем при производстве первичного материала, но при этом свойства вторичного полистирола идентичны характеристикам оригинального. Материал может использоваться в упаковке, контактирующей с пищевыми продуктами, поскольку он соответствует строгим спецификациям для пищевых продуктов.

Компания Agilyx является ведущим разработчиком технологий химической переработки для трудноперерабатываемых смешанных полимерных отходов, включая полистирольные отходы с закончившимся сроком жизни. Agilyx разработала первую в мире систему, способную перерабатывать отходы полистирола, в том числе вспененного, в мономер стирола, который затем используется для повторного производства новых про-

дуктов из полистирола. Несколько лет назад компания запустила собственную программу агрегации сырья в Орегоне (США), где собирает отходы полистирола примерно от 500 различных клиентов.

Суть запатентованной технологии деполимеризации от Agilyx состоит в нагреве пластика, помещенного в специальную камеру без присутствия кислорода, что заставляет полимер распадаться на базовые строительные блоки (момеры). Agilyx оценивает состав отходов и успешно перерабатывает их в исходный жидкий мономер, используя свою уникальную модель деполимеризации, нацеленную прежде всего на переработку полистирола. Процесс деполимеризации методом нагрева доступен только для полистирола (ПС) и полиметилметакрилата (ПММА), которые единственные среди всех пластиков обладают способностью распадаться на мономерные звенья при нагреве в диапазоне 300-600°C.

Этот проект продемонстрировал изумительную пригодность полистирола к полноценной переработке. Полистирол — это полимер, который легко превращается в исходный мономер с высоким выходом благодаря новым революционным технологиям рециклинга. Жидкое состояние его мономера обеспечивает легкую очистку от загрязняющих примесей. Переработанный мономер идентичен первичному мономеру. Таким образом, его можно перерабатывать в стирольные полимеры с равным оригинальному пластику качеством, что позволяет использовать его во всех областях применений, включая упаковку, контактирующую с пищевыми продуктами.

Технология оказалась настолько удачной, что кроме собственного завода, что Agilyx в сотрудничестве с компаниями Trinseo, INEOS Styrolution, Toyo Styrene (Япония) построены и уже эксплуатируются несколько заводов по переработке всех видов полистирола в Азии, США, Европе и Японии.

Компания Recycling Technologies совместно с Ineos Styrolution эксплуатирует свою собственную технологию деполимеризации стирольных пластиков на базе имеющегося у нее метода переработки смешанных полимеров.

Активность всех участников цикла переработки полистирола (государственных органов, выделяющих гранты на разработки и опытные исследования; научных институтов и организаций, разрабаты-

ющих новые технологии и оборудование; негосударственных организаций в США (PLASTICS и Polystyrene Recycling Alliance (PSRA — Союз переработчиков полистирола)) и Европе (консорциум SCS); различных крупных компаний) просто впечатляет. Вот так на деле и работает настоящая мусорная реформа, целью которой является недопущение попадания ценнейших полимерных продуктов на полигоны.

Для продуктивной работы технологий нужна инфраструктура сбора постпотребительского полистирола, чтобы не допустить его попадания на полигоны. Тогда, учитывая, что благодаря вышеупомянутым технологиям полистирол перерабатывается практически бесконечное число раз, новые методы дают возможность по-настоящему замкнуть цикл производства, использования и переработки ПС, каждый раз получая продукт с допуском для контакта с пищей. Эти формы химического рециклинга получили название «процесс PolyUsable». Он обеспечивает на 50-70% меньший углеродный след по сравнению с тем же показателем, характеризующем выпуск первичного полистирола.

Канадская фирма Pyrowave создала свою технологию микроволновой деполимеризации полистирола. Как член рабочей группы по технологиям консорциума Styrenics Circular Solutions (SCS) компания вместе с Trinseo, INEOS Styrolution, Total и Versalis (Eni) увидела большой потенциал в процессе каталитической микроволновой деполимеризации. По мнению специалистов Pyrowave, это новый способ переработки полистирола в высококачественный мономер, позволяющий заменить первичный мономер на вторичный для применений, подобных первичным. Под воздействием микроволнового излучения в присутствии катализатора происходит разрыв связей между блоками мономера без их повреждения, что позволяет после очистки собрать момеры в новые цепи с образованием нового полистирола, идентичного первичному.

С учетом недавнего прогресса, достигнутого в сфере химической переработки и доказавшего, что полистирол — это полимер с наилучшими возможностями для переработки после окончания срока жизни изделий из него, соучредитель и генеральный директор Pyrowave Джоселин Дусе советует производителям и владельцам брендов, желающим отказаться

от этого материала, пересмотреть свои стратегии: «Мы считаем, что затраты на модернизацию существующей производственной инфраструктуры и переход с полистирола на другие полимеры в сочетании с тем фактом, что эти другие пластики не являются лучшей альтернативой для переработки, свидетельствуют о правомерности использования полистирола. Технология Pyrowave разрабатывалась 10 лет и уже коммерциализирована». Компания активно сотрудничает с Michelin Group с целью массового использования вторичного полистирола при производстве шин и других товаров.

Американские компании Lummus Technology и Resynergi также объявили о коммерциализации модулей Resynergi для непрерывной деполимеризации отходов пластмасс с использованием микроволн (Continuous Microwave Assisted Pyrolysis — CMAP).

Пиролиз с последующей дистиляцией

Пиролиз — технология термического крекинга, которая преобразует отходы пластика и загрязняющие его вещества, обратно в основные компоненты: углеводороды и синтез-газ (газовая смесь CO , CO_2 , H_2 и CH_4). Для переработки полистирола пиролиз практически не используется. Но комбинация пиролиза и дистиляции делает переработку полистирола вполне возможной.

Рик Лингл, главный технический редактор ресурсов Packaging Digest и Plastics Today, отмечает достоинства данной технологии: «Пиролиз с последующей дистиляцией обеспечивает эффективную переработку полистирола с распадом на мономерные звенья и удалением загрязняющих примесей. Показатель переработки полистирола может быть увеличен до 60% от общего количества полистирольных изделий, упаковки. Использование проверенных технологий означает, что процесс готов к внедрению».

Данная технология предполагает разрушение цепочек с последующим восстановлением молекулярной структуры полистирола. Основная часть технологии — это пиролиз, при котором материалы нагреваются в отсутствие кислорода до температуры 400-1000°C, пока связи между молекулами не будут разорваны. Полистирол при этом преимущественно распадается на мономерные звенья. Это открывает возможности использования





пиролиза для восстановления мономера с последующей реполимеризацией для производства полистирола, по качеству не отличающегося от первичного, полученного из нефти.

Разработчики проанализировали простой процесс, сочетающий пиролиз и дистилляцию, и сделали вывод, что метод потенциально может быть масштабируемым, конкурентоспособным и энергоэффективным. Свои выводы они изложили в статье «Термодинамический и экономический анализ масштабируемого процесса извлечения мономера стирола высокого качества из отходов полистирола», которая была опубликована в журнале Chemical Engineering Journal.

Достоин лучшего отношения

Подводя итоги, можно отметить, что полистирол в разного вида модифика-

циях является полимером, обладающим уникальными достоинствами и потенциалом, так как изделия из него беспроблемно сортируются. ПС может повторно перерабатываться всеми известными способами и обладает способностью к простому и многократному разложению на мономерные звенья, в полученный из вторичного мономера стирола полистирол не уступает по качеству первичному. В процессе полимеризации стирола, полученного путем химического рециклинга или другим способом, выбросы CO_2 на 50-70% меньше, чем при производстве полимера из нефти.

Появление новых технологий (химического рециклинга, микроволнового излучения, растворения в сольвенте, комбинации существующих технологий) позволяет значительно увеличить процент переработки ПС, особенно учитывая простоту некоторых видов переработки. Повышение качества механической очистки полистирола способствует его повторному использованию без применения химического рециклинга.

Таким образом, полистирол как уникальный материал достоин лучшего отношения со стороны тех, кто может принимать решения о запрете использования отдельных видов полимеров.

С целью постепенного создания рынка вторичного полистирола надо организовать сбор ПС вместе с другими видами пластиков отдельно от стекла и картона, и далее отсортировать по типам материала. Для создания инфраструктуры раздельного сбора можно и нужно использовать средства РОП.

Для разработки мер по укреплению положительного имиджа полистирола и других полимеров на его основе, а также консолидации усилий заинтересованных сторон, необходимо создать рабочую группу, объединяющую экспертов Союза переработчиков пластмасс и Российского союза химиков. Основными драйверами усилий по переработке полистирола в рамках такой группы стали бы крупнейшие поставщики и переработчики стирольных пластиков в России и Белоруссии. Группа может привлекать научные институты РФ и Республики Беларусь для разработки собственных технологий переработки полистирольных пластиков, производителей оборудования — для создания необходимого оборудования и для продвижения технологий в реальном секторе.

Литература

1. SIBUR for Clients. Issue 22. 2024
2. Рожавский М.Г. Полистирольные пластики в упаковке. Часть 1, 2012. <https://article.unipack.ru/38377>. Часть 2, 2012. <https://article.unipack.ru/38383/>
3. Pyrowave receives recognition for its technology to depolymerize plastics. Recycling Today. June 23, 2017. <https://www.recyclingtoday.com/news/pyrowave-plastics-depolymerization-technology-recognized/>
4. Zhao Y.-B. et al. Solvent-based separation and recycling of waste plastics: a review // Chemosphere. 2018.
5. Aciu C. et al. Recycling of Polystyrene Waste in the Composition of Ecological Mortars // Procedia Technology. 2015.
6. Polystyrene Market by Type, Application — Global Forecast 2025-2030. Research and Markets. <https://www.researchandmarkets.com/report/polystyrene#tag-pos-1>
7. Polystyrene we love you. Plastics in Packaging. Sayers Publishing Group. October, 2021.
8. Plastics Recycling World. January/February, 2023.
9. INEOS Styrolution выпустила вторичный полистирол пищевого качества. 24.12.2024. https://www.plastinfo.ru/information/news/54560_24.12.2024/
10. Преимущества БОПС-пленок для производства жесткой упаковки (MARCHANTE S.A.S., www.marchante.fr) // «Экструзия». 2021, №1.