

Л.Ю. Коваленко, канд. хим. наук, ведущий химик,
ООО фирма «Проминвест Пластик»

Вопросы экологии при использовании ПВХ и полиолефиновых композиций в кабельной промышленности



Аннотация. В статье приведена обобщённая информация, затрагивающая основные экологические вопросы, которые возникают при производстве кабельных изделий. Проанализировано влияние вредных факторов, возникающих на протяжении всего жизненного цикла кабеля, на экологическую ситуацию. Рассмотрены основные пути утилизации кабельной продукции.

Ключевые слова: кабели; экология; переработка; твёрдые полимерные отходы (ТПО).

Abstract. The article contains generalized information concerning the main environmental issues that arise during the manufacture of cable products. The adverse effect of the harmful factors that occur throughout the life cycle of the cable on the environmental situation is analyzed. The main methods of cable recovery are considered.

Key words: cables; ecology; recycling; plastic solid waste (PSW).

Материал поступил в редакцию 17.10.2018
E-mail: l.kovalenko@prominvest.com.ua

ВВЕДЕНИЕ

Экономический рост и рост населения приводит к всё большему спросу на пластмассы. Так, глобальное производство пластмасс составило 299 млн т в 2013 г.; в течение 2014 г. было зарегистрировано увеличение на 4 %, и оно составило 311 млн т [1].

Полиэтилен низкой плотности (LDPE), полиэтилен высокой плотности (HDPE), полиуретан (PUR), полипропилен (PP), поливинилхлорид (PVC), полистирол (PS) и полиэтилентерефталат (PET) составляют 80,7 % европейского спроса на пластмассы в 2016 г. (рис. 1). Среди этих семи основных видов полимеров потребление ПВХ составляет 10 % от общего спроса.

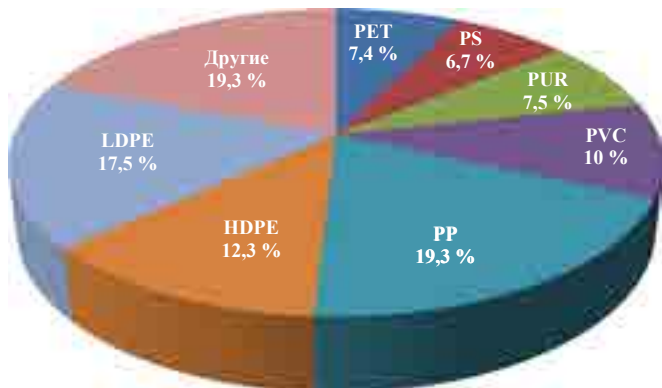


Рис. 1. Европейский спрос на пластмассы [2]



Рис. 2. Применение ПВХ по всему миру [3]

В 2016 г. мировые мощности по производству ПВХ для изделий на его основе составляли около 42 млн т. Крупнейшими рынками являются трубы и оконные профили, а затем жёсткие плёнки и кабели, как показано на рис. 2.

Распределение потребления полимерных материалов в кабельном производстве выглядит следующим образом (рис. 3). Превалирующими материалами на данном рынке являются ПВХ-компаунды. Они, соответственно, вносят наибольший вклад в экологический аспект кабельной промышленности.

В процессе производства ПВХ используется широкий спектр добавок, которые могут улучшить механические

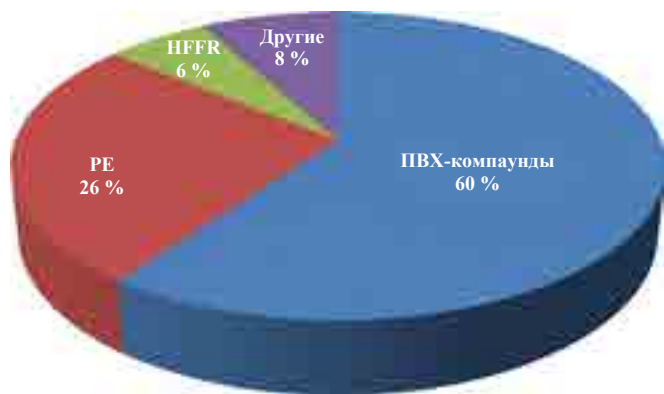


Рис. 3. Потребление полимерных материалов в мировом кабельном производстве [4]

свойства ПВХ-изделий и расширяют области их применения. Несмотря на то, что многие изделия из ПВХ имеют более длительный срок службы, чем другие пластмассы, они в конечном итоге станут твёрдыми отходами [5].

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Уже сегодня, приступая к решению любой проблемы науки, техники, производства, необходимо сразу же рассматривать эту проблему и с точки зрения экологии. При этом в современном понятии оценка взаимодействия с окружающей средой должна осуществляться для всего жизненного цикла продукта: используемые материалы,

конструкция, производство, эксплуатация, утилизация после эксплуатации [6].

На рис. 4 представлен жизненный цикл полимерных материалов в кабельной промышленности. Он начинается с этапа производства сырья. Потом на этапе переработки из смолы получают пластикат. При этом используют разнообразные добавки – стабилизаторы, пластификаторы и наполнители (для ПВХ-компаундов). На данном этапе жизненного цикла необходимо учитывать факторы опасности всех компонентов, используемых в производстве пластикатов. На этапе производства кабельных изделий рассматривают выделение летучих компонентов в процессе экструзии. Далее идёт непосредственно этап эксплуатации и, по его окончанию, стадия утилизации.

ВЛИЯНИЕ ПВХ-КОМПОЗИЦИЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

С учётом объёмов потребления наиболее критичным материалом в кабельном производстве с точки зрения воздействия на окружающую среду (ОС) являются ПВХ-композиции. Объём потребления ПВХ для кабелей и проводов в пересчёте на смолу составляет ориентировочно 10 % от мирового потребления ПВХ (примерно 4 млн т), а это значительная цифра. Значит, велика и экологическая нагрузка на природу от деятельности данного сектора кабельной промышленности.

Среди добавок, которые традиционно используются в ПВХ-композициях, имеются потенциально экологически опасные вещества. В основном с ПВХ-пластикатами связывают выделение в окружающую среду таких загрязнителей, как полихлорированные дибензодиксины,

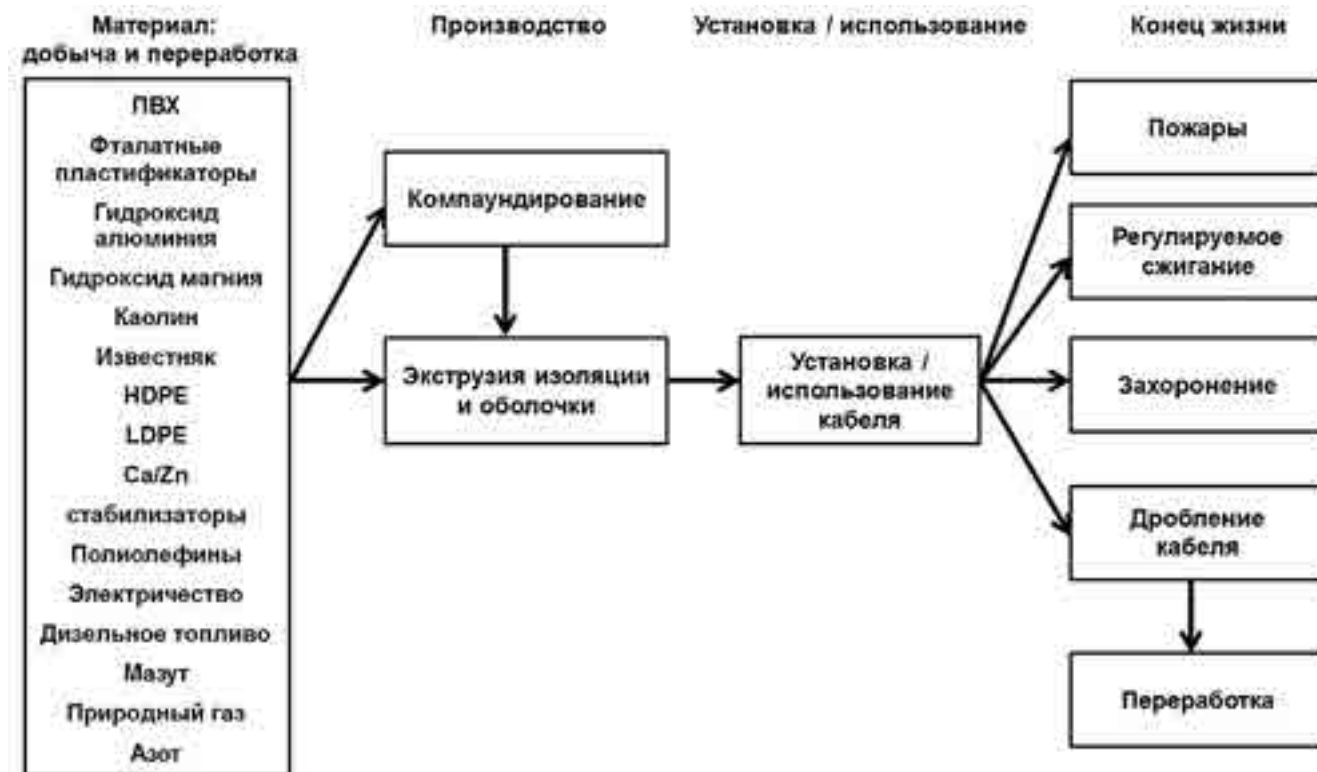


Рис. 4. Жизненный цикл полимерных материалов в кабельной промышленности

полихлорированные дибензофураны (диоксины), свинец и фталатные пластификаторы.

Как известно, для того, чтобы образовались диоксины, необходимо четыре составляющих – источник хлора, источник углерода (органика), кислород и высокая температура (около 700 °С). Из этого следует, что при переработке ПВХ-пластиков не могут выделяться диоксины, так как переработка происходит при гораздо меньших температурах (150–190 °С). Также этого не происходит на этапе эксплуатации кабельных изделий. Следовательно, образование диоксинов в жизненном цикле ПВХ возможно только на этапах изготовления и утилизации (сгорания). Причём в начале 90-х годов данные Управления по охране окружающей среды США подтвердили информацию производителей и переработчиков ПВХ, что это самый незначительный источник диоксинов для ОС.

Неорганические и органические соли кальция, цинка, свинца и олова исторически использовались в качестве термостабилизаторов. Из-за вредного воздействия, связанного с потенциальным высвобождением токсичных металлов и их накоплением в организме человека, ЕС прекратил использование стабилизаторов на основе кадмия в производстве ПВХ. Также согласно добровольному обязательству под названием «Vynil Plus», которое пришло на смену «Vynil 2010» [7], в декабре 2015 г. прекратились продажи стабилизаторов на основе свинца членами ESPA (The European Stabilizer Producers Association). В настоящее время ЕСНА (European Chemicals Agency) рассматривает предложение о введении 0,1 % порога содержания свинца для изделий, не содержащих переработанный ПВХ. В случае изделий, изготовленных с использованием рециклированного ПВХ, эти пределы могут быть выше. Запреты на токсичные металлы усилили внимание к стабилизаторам, содержащим кальций и цинк, и к новым безметалловым системам.

Наряду с вопросами о вреде свинцовых стабилизаторов были также высказаны опасения по поводу использования пластификаторов в изделиях из ПВХ. Наиболее распространёнными пластификаторами являются стандартные фталаты (то есть сложные эфиры фталевого ангидрида с C8 – C10 спиртами), из которых 90 % ежегодно используются в производстве ПВХ (EVCМ, (The European Council of Vinyl Manufacturers), 2016). Самая большая проблема, связанная с использованием фталатов, связана с эндокринной модуляцией и предполагаемым нарушением здоровья человека, особенно с токсическим эффектом на размножение и фертильность. ЕС ограничил использование фталатов с короткой цепью и низкой молекулярной массой, таких как бис (2-этилгексил) фталат (DEHP), дибутилфталат (DBP), диизобутилфталат (DIBP) и бензилбутилфталат (BBP), в качестве пластификаторов и запретил их использование в игрушках и детских изделиях (Директива 2005/84 / ЕС); такое же ограничение было распространено и на всё электротехническое и электронное оборудование (Commission Delegated Directive (EU) 2015/863).

Высокомолекулярные и длинноцепочечные фталаты (например, диизононилфталат (DINP), диизодецилфталат (DIDP) и ди-(n-октил) фталат (DNOP)) могут использоваться при ограниченных концентрациях в игрушках

и детских изделиях (Директива 2005/84 / ЕС). Оценка риска Европейским химическим агентством показала, что неприемлемый риск не был характерен для использования DINP и DIDP (ЕСНА, 2010a, b). Эти же выводы были подтверждены и в отчёте комитета «Vynil Plus» в 2018 г. [7]. Разрешение на использование DEHP всё ещё ожидается. [8]

ВЛИЯНИЕ ПОЛИОЛЕФИНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Для решения вопросов, связанных с уменьшением выделения вышеописанных загрязнителей, всё большее место занимает использование полиолефиновых материалов (ПО), не уступающих ПВХ по стойкости к распространению огня и другим технологическим и эксплуатационным характеристикам.

ПО-материалы производятся из ископаемых видов топлива, таких как сырая нефть, и имеют энергетическое содержание, эквивалентное энергетическому содержанию углеводородного сырья, из которого они производятся. Помимо выделения из сырого сырья, производство полимера включает крекинг, производство мономеров и производство полимеров. Эти процессы очень энергоёмкие. Эксперты прогнозируют, что доступность ископаемых видов топлива может быть ограничена длительностью жизни от одного до трёх поколений. Только 4 % нефтяных ресурсов используется для производства полимеров, однако экологические последствия, связанные с удалением полимерных отходов, отсутствием мест захоронения отходов и истощением ископаемого топлива велики, что побудило отрасль полимерного производства искать альтернативные решения. Поскольку полиолефины имеют огромную долю рынка среди полимерных материалов (рис. 1), небольшое улучшение в плане устойчивости этих материалов может существенно повлиять на окружающую среду.

В качестве наполнителей в полиолефиновых компаундах используются гидроксиды алюминия, магния, мел. Они не оказывают существенного влияния на окружающую среду [9].

УТИЛИЗАЦИЯ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Анализ ситуации, выполненный международными экспертами, показывает, что собственно кабельное производство (промышленные выбросы от производственных процессов) из всего жизненного цикла продукции представляет менее существенную проблему для окружающей среды, чем, например, проблема переработки отходов, и не требует широкого привлечения внимания общественности. Это связано с тем, что во многих странах всё более жесткие законы заставляют изготовителей кабелей сокращать промышленные выбросы и разрабатывать экологически безопасные процессы.

Процесс утилизации кабельной продукции чаще всего сводится к извлечению медной/алюминиевой жилы, а оставшаяся полимерная часть либо сжигается, либо идёт на захоронение. И сейчас можно встретить предложения (Midas, Nexans и др.) о покупке всех типов оставшихся

кабелей (лом, отходы, излишки и обрез), при этом не имеет значения тип изоляционного материала. [10, 11]

Также разработана и применяется для ПВХ-кабелей компанией Solvay SA и несколькими её партнёрами по производству технология «Vinyloop» [12], в процессе которой восстанавливается ПВХ из измельчённых кабелей после удаления меди. Полученный ПВХ может быть использован вторично для производства новых ПВХ-изделий.

Существует и ещё несколько технологий переработки кабельных отходов [13]. Главная цель – качественно отделить изоляционные материалы от металлических жил.

В зависимости от особенностей кабеля применяют:

- Сжигание изоляционных материалов. Это самый простой и дешёвый способ – на открытом огне сжигается изоляция и обнажается металлическая жила. Способ приемлем, в основном, для тонких кабелей в ПВХ оболочке. Недостатки обжига – выбросы вредных компонентов в атмосферу, возможность пожара, потери верхних слоёв жил.

- Ручное отделение изоляции от металлических жил. Способ трудоёмкий и имеет место, если объём отходов небольшой. Ещё один недостаток – низкое качество, на жилах остаются небольшие частицы пластмассового или резинового покрытия.

- Автоматическое удаление бронированного, пластмассового и прочих покрытий на передвижных стрипперах. Достоинства метода – чистота сырья, невысокая стоимость, компактность устройства. Недостатки – ограничения по сечению провода, много ручного труда.

- Заморозка жидким азотом и отделение изоляции на валах. Способ весьма дорог и пока распространения не нашёл.

- Механическая переработка кабеля на автоматизированных линиях с компьютерным управлением. Самый экономичный способ получения чистого сырья с минимальным количеством отходов.

- Удаление пластмассовых оболочек путём химического растворения. Применяется для медных кабелей. На выходе собирается медь высокого качества и полимер без примесей, который также можно использовать вторично.

УТИЛИЗАЦИЯ ТВЁРДЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Однако, несмотря на описанные выше способы утилизации кабельной продукции, переработка полимерной составляющей кабеля экономически не выгодна, в связи с чем, в мире всё больше накапливается твёрдых полимерных отходов (ТПО).

Так, в 2014 г. в Европе было переработано только 29,7 % полимерных отходов, 39,5 % были выделены в качестве энергии, а 30,8 % по-прежнему были захоронены на полигонах. Этот низкий коэффициент рециркуляции можно объяснить сложностью и финансовыми затратами на сортировку полимеров, смешиванием различных источников отходов, низкой стоимостью первичного сырья, потерей свойств из-за старения и примесей, и несовместимостью полимеров. Кроме того, развивающиеся страны мира полагаются исключительно на захоронение отходов, как стратегию утилизации ТПО. Увеличение захоронения отходов также связано с серьёзными проблемами в области охраны здоровья и окружающей среды, а именно с загрязнением подземных вод, увеличением выбросов парниковых газов (ПГ), риском пожара и взрыва, опасности для здоровья человека и санитарными проблемами (Кумар и Шарма, 2014 г.) [14]. Кроме того, количество мест захоронения отходов быстро снижается, и в большинстве стран законодательство о полигонах становится всё более жёстким.

Учитывая серьёзные проблемы загрязнения окружающей среды, вызванные полимерными отходами, Европейская комиссия приняла законодательное предложение [15] связанное с отходами на полигонах. Суть этого предложения состояла в том, чтобы к 2025 г. поэтапно отказаться от захоронения перерабатываемых отходов (включая полимеры, бумагу, металлы, стекло и биоотходы).

Было разработано несколько методов переработки полимерных материалов в зависимости от типа полимера, конструкции упаковки и источников пластмасс. Вне зависимости от применяемого метода рециркуляции ТПО должны пройти ряд ключевых шагов, включая сбор, сортировку, очистку, уменьшение размера и разделение до шагов по восстановлению.

Терминология переработки полимеров является сложной и иногда запутанной из-за широкого спектра методов утилизации и восстановления. ISO и Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM) стандартизировали классификацию и их определение по четырём категориям (табл. 1) [16, 17]. Согласно ISO 15270 механическая рециркуляция – это переработка отходов пластмасс во вторичное сырьё или изделия без существенного изменения химической структуры материала; химическая рециркуляция – это превращение в мономер или производство нового сырья путём изменения химической структуры отходов пластмасс путём крекинга, газификации или деполимеризации, исключая восстановление энергии и сжигание; восстановление энергии – это производство полезной энергии путём прямого и управляемого сжигания. Эта классификация часто использовалась в научной литературе. Четыре

Таблица 1

Терминология, связанная с переработкой полимеров

Определения согласно стандарту ASTM D 7209-06	Эквивалентные стандартные определения ISO 15270	Другие эквивалентные термины
Первичная переработка	Механическая рециркуляция	Повторная экструзия, повторное использование, рециркуляция в замкнутом контуре
Вторичная переработка	Механическая рециркуляция	Понижение класса
Третичная переработка	Химическая переработка	Переработка сырья
Четвертичная переработка	Восстановление энергии	Валоризация, рекуперация энергии

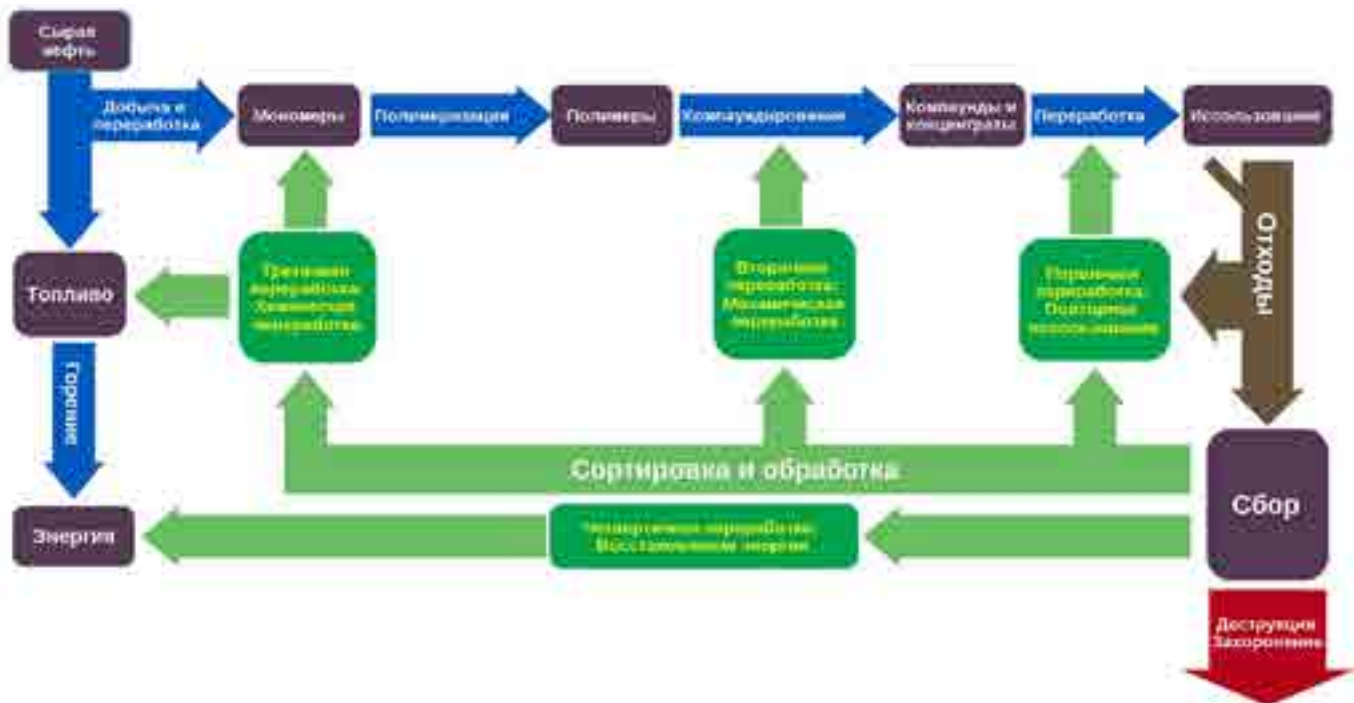


Рис. 5. Интеграция процессов восстановления отходов в цикл производства пластмассы

процесса восстановления пластмассовых отходов могут быть интегрированы в цикл производства пластмассы, как показано на рис. 5.

Первичная переработка включает повторное введение в потребительский цикл остатков (лома, промышленных или однослойных пластмассовых краев и деталей) в цикл экструзии для получения продуктов из того же материала. Такая процедура обычно применяется непосредственно изготовителем полимерной продукции (рециркуляция допотребительских отходов). Первичная рециркуляция пластмассы считается лучшим методом переработки, поскольку она использует меньше энергии и меньше ресурсов, сохраняя при этом ископаемое топливо. Некоторые хорошо идентифицированные потребительские товары также могут подвергаться первичной переработке. Например, в Ростоке, Германия, Veolia даёт вторую жизнь пластиковым бутылкам. После сбора и сортировки бутылки измельчают и промывают горячей водой. Полученные хлопья полиэтилентерефталата (ПЭТ) очищают перед упаковкой для отгрузки изготовителям бутылок и затем они повторно используются для производства новых бутылок.

Вторичная рециркуляция или механическая рециркуляция относятся к операциям, которые восстанавливают ТПО через механические процессы. Таким образом, новый переработанный материал может быть превращён в новые полимерные изделия, заменяя исходные полимеры. Такой способ ухудшает свойства материала, подлежащего вторичной переработке.

Третичная рециркуляция или химическая рециркуляция – это термин, используемый для процессов (пиролиз), которые превращают полимерные цепи в более мелкие молекулы, которые вновь могут использоваться в качестве исходного сырья для производства топлива, новых полимеров или других химических веществ.

Пиролиз имеет экологические преимущества по сравнению с другими методами обработки ТПО, поскольку

он проходит в инертной атмосфере, таким образом, не производит диоксинов и уменьшает выбросы монооксида и диоксида углерода. Это гибкий процесс, так как условия, такие как температура, давление, время пребывания, могут быть легко изменены для достижения желаемого качества (типа) и количества продукта. Каталитический пиролиз имеет несколько преимуществ перед термическим процессом, поскольку он повышает эффективность за счёт уменьшения времени протекания процесса и влияет на селективность продукта.

Четвертичная рециркуляция или извлечение энергии состоит из сжигания полимерных отходов и восстановления энергии за счет производства тепла и/или электричества. В настоящее время рекуперация энергии остаётся наиболее распространённым способом восстановления отходов после использования пластмасс в ЕС; 39,5 % пластмассовых отходов всё ещё восстанавливались такими процессами в 2015 г. [18].

Сжигание пластмассовых отходов в ЕС регулируется Директивой 2000/76/ЕС [19].

Эта обработка, даже если она не считается процессом рециркуляции в ЕС, может быть использована, когда механические процессы неэффективны из-за чрезмерного загрязнения, затруднений разделения или чрезмерного ухудшения свойств полимера. Действительно, их высокая теплотворная способность делает ТПО удобным источником для производства энергии. Полимеры могут сжигаться совместно с другими отходами или использоваться в качестве топлива, полученного из отходов в других отраслях промышленности [20], таких как цементные печи.

В настоящее время индустрия переработки полимеров страдает от отсутствия экономической рентабельности, что приводит к развитию восстановления энергии путём сжигания (четвертичная переработка) в качестве экономически жизнеспособной альтернативы. Похоже, что

полная сортировка ТПО составляет основную причину дополнительных затрат на переработку, что побуждает исследователей сосредоточиться на механической рециркуляции смешанных пластиковых отходов (СПО). Такая стратегия является технологической проблемой из-за присутствия в СПО широкого разнообразия несовместимых полимеров и требует совместимости смесей [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производство и потребление кабельной продукции постоянно возрастает, что приводит к непрерывному увеличению количества отходов в виде кабелей и полимеров с истёкшим сроком эксплуатации на полигонах и естественных средах обитания во всём мире. Рециркуляция стала важнейшей экономической и экологической проблемой, учитывая необходимость ограничения воздействия пластмасс на окружающую среду. Однако относительно высокие затраты на рециклинг, низкая стоимость энергии и низкая стоимость захоронения на суше явно препятствуют развитию рециркуляции. Тем не менее, установление более жёсткого законодательства по сокращению отходов на полигонах привело к тому, что разрабатываются более эффективные методы переработки и утилизации.

Несмотря на значительный прогресс в вопросе рециклинга кабельной продукции, этот процесс на данный момент является экономически не рентабельным, требует существенных капитальных затрат и доступен только для крупных предприятий. Основные дополнительные затраты при рециркуляции кабельной продукции приходятся на её сбор, сортировку, очистку, уменьшение размера и разделение.

В связи со всем вышеперечисленным возникает вопрос, как мы, как производители компаундов, можем повлиять на улучшение окружающей среды (или хотя бы не ухудшение) в условиях повышенного спроса на полимеры и продукты на их основе? А можем мы за счёт повышения качества и улучшения свойств полимерных материалов увеличить срок их эксплуатации в составе изделий, тем самым не только сокращая количество отходов в виде изделий с закончившимся сроком эксплуатации, но и давая время для улучшения существующих или разработки новых методов утилизации. Очевидно, что это будет способствовать уменьшению влияния кабельных изоляционных материалов на окружающую среду.



ЛИТЕРАТУРА

1. WI, 2015. World Watch Institute, Global Plastic Production Rises, Recycling Lags. New World Watch Institute Analysis Explores Trends in Global Plastic Consumption and Recycling, January. URL:

http://www.vitalsigns.worldwatch.org/sites/default/files/vital_signs_trend_plastic_full_pdf.pdf (дата обращения: 15.10.2018).

2. PlasticsEurope, E., 2017. Plastics – the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data. URL: <https://www.issuelab.org/resource/plastics-the-facts-2017-an-analysis-of-european-plastics-production-demand-and-waste-data.html> (дата обращения: 15.10.2018).

3. Dr. Karl-Martin Schellerer, Thomas Kufner, Dr. Peter Attenberger, Dr. Frank Riedmiller, Malte Bahls, Dr. Oliver Mieden. Advanced and Sustainable Properties for the Construction, Automotive and Consumer Goods Industry // Kunststoffe International. – 2017– Issue 10. – P. 8–13.

4. Prospects and developments for the wire & cable industry // Cables 2018. – Cologne, Germany, 6–8 March 2018. AMI.

5. Sadat-Shojai, M., Bakhshandeh, G.-R. Recycling of PVC wastes // Polym. Degrad. Stab. – April 2011 – Vol. 96, Issue 4. – P. 404–415.

6. Мещанов Г.И. Экологические аспекты кабельного производства // Кабели и провода. – 2000. – № 6. – С. 35–40.

7. Progress report 2018, Vinyl Plus, 36 pages. URL: <https://www.vinylplus.eu/documents/47/59/New-VinylPlus-Progress-Report-2018> (дата обращения: 15.10.2018).

8. L. Ciacci, F. Passarini, I. Vassuraab. The European PVC cycle: In-use stock and flows // Resources, Conservation and Recycling. – August 2017 – Vol. 123. – P. 108–116.

9. Функциональные наполнители для пластмасс / Под ред. М. Ксантоса. Пер. с англ. под ред. Кулезнева В.Н. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 462 с.

10. Brochure. Nexans recycling services. URL: <https://www.nexans.com/newsroom/publications.html> (дата обращения: 15.10.2018).

11. Cable recycling. URL: <https://www.cablerecycling.com/> (дата обращения: 15.10.2018).

12. <http://www.vinylloop.com/en/> (дата обращения: 20.06.2018).

13. Особенности переработки кабеля. URL: <http://www.vtorothodi.ru/pererabotka/pererabotka-kabelya> (дата обращения: 21.11.2018).

14. Kumar A., Sharma M.P. GHG emission and carbon sequestration potential from MSW of Indian metro cities // Urban Clim. – June 2014. – Vol. 8. – P. 30–41.

15. Proposal amending for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directives 2008/98/EC on waste, 94/62/EC on packaging and packaging waste, 1999/31/EC on the landfill of waste, 2000/53/EC on end-of-life vehicles, 2006/66/EC batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, and 2012/19/EU - on waste electrical and electronic equipment /* COM/2014/0397 final – 2014/0201 (COD) */. in: European Commission (Ed.) 2014.

16. Plastics – Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste ISO 15270:2008 Plastics – Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste.

17. Standard Guide for Waste Reduction, Resource Recovery, and Use of Recycled Polymeric Materials E and Products (Withdrawn 2015), ASTM D7209-06, Standard Guide for Waste Reduction, Resource Recovery, and Use of Recycled Polymeric Materials and Products (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, 2006.

18. PlasticsEurope, Plastics – the Facts 2016, in: B. PlasticsEurope Brussels (Ed.) 2016.

19. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste // Official Journal of the European Communities L 332. – 28 December 2000. – Vol. 43. – P. 91–111.

20. N. Chatziaras, C. Psomopoulos, N. Themelis. Use of alternative fuels in cement industry // Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment. – June 2014. – Vol. 1. – P. 521–529.

21. Joachim Maris, Sylvie Bourdon, Jean-Michel Brossard, Laurent Cauret, Laurent Fontaine, Véronique Montembault. Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes // Polym. Degrad. Stab. – January 2018. – Vol. 147. – P. 245–266.