

Таким образом, дальнейшее снижение ЙЧ НПС возможно за счет увеличения продолжительности синтеза при 250–260°C, применения катализаторов, ускоряющих полимеризацию, либо путем гидрирования НПС непосредственно в реакционной смеси или после выделения из нее.

### Литература

1. Акишин, Д. Не пиролизом единым. Как нефтехимия может спасти НПЗ [Электронный ресурс] / Д. Акишин // Химическая промышленность. Приложение к газете «Коммерсантъ». 11.07.2019. № 120. С. 3. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4026276>.

2. Перспективы развития [Электронный ресурс] // Официальный сайт завода «Полимир» ОАО «Нафтан». URL: <http://www.polymir.by/prospect>.

3. Юсевич, А.И. Получение нефтеполимерной смолы с заданными свойствами из тяжелой смолы пиролиза / А.И. Юсевич, К.И. Трусков, Ж.С. Шашок, Е.П. Усс, С.А. Перфильева // Труды БГТУ. Сер. 2. Хим. технол., биотехнол., геозкол. – 2018. – №1 (205). – С. 147–153.

4. Перфильева, С.А. Исследование влияния нефтеполимерных смол на свойства ненаполненных эластомерных композиций / С.А. Перфильева, Ж.С. Шашок, Е.П. Усс, А.И. Юсевич, К.И. Трусков // Труды БГТУ. Сер. 2. Хим. технол., биотехнол., геозкол. – 2018. – №1 (205). – С. 92–98.

5. Юсевич, А. И. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов [Электронный ресурс] / А. И. Юсевич. – Минск: БГТУ, 2013. – 135 с. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/23714>.

УДК 678.4.065.002.8:665.6.033

**Юсевич А.И., Куземкин Д.В.**

(Белорусский государственный технологический университет)

### **НА ПУТИ К ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКЕ: ХИМИЧЕСКИЙ РЕЦИКЛИНГ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Материалы на основе синтетических полимеров находят применение практически во всех сферах человеческой деятельности благодаря уникальному сочетанию качеств: прочности, легкости, долговечности, технологичности в обработке и относительной дешевизне. Не удивительно, что спрос на них постоянно растет. В мировом масштабе ежегодное производство базовых полимеров, смол и эластомеров

приближается к 400 млн. т, увеличившись за последние двадцать лет в 2,5 раза [1]. Ожидается, что в ближайшие двадцать лет оно еще как минимум удвоится [2]. Срок службы изделий из полимеров варьируется в среднем от 1 года для упаковки до 30–40 лет для конструкционных и строительных материалов, после чего они становятся отходами. Образование первичных полимерных отходов в мире достигло 300 млн. т в год [1] и продолжает увеличиваться.

Полимерные отходы можно направлять на переработку (рециклинг) либо сжигать с производством энергии. Сжигание как утилизационная технология дает быстрый экономический эффект, однако не рационально с точки зрения термодинамики, т. к. на производство полимерного материала всегда расходуется значительно больше энергии, чем удастся извлечь и использовать в результате сжигания. Кроме того, безвозвратно теряется первичное углеводородное сырье и в атмосферу поступает избыточное количество углекислого газа.

Среди методов рециклинга полимерных материалов можно выделить первичные, вторичные и третичные. К первичным относятся методы механической переработки отходов под воздействием повышенных температур и давлений с получением того же продукта, что и из первичного полимера. Первичному рециклингу хорошо поддаются термопластичные полимеры (ПЭВД, полипропилен, полистирол, поликарбонат и пр.). Такой подход к переработке полимерных отходов является предпочтительным, т. к. позволяет сохранить максимальное количество энергии, потраченной на производство первичного материала. Однако он не может быть применен, если требуется переработать смеси разнородных полимеров (в т. ч. многослойные пленки), терморезистивные смолы, сшитые полимеры либо высоконаполненные полимерные композиционные материалы, например, угле- и стеклопластики, резины. Кроме того, при тепловой обработке термопластов происходит частичная деструкция макромолекул, из-за чего качество изделий из вторичного сырья бывает хуже, чем из первичных полимеров.

Вторичный рециклинг заключается в механической или механохимической переработке отслуживших полимерных изделий с получением продукции иного назначения, как правило, менее ценной. Выгода в данном случае обусловлена снижением энергозатрат на процесс, т. к. для изготовления аналогичной продукции из первичного нефтехимического сырья потребовалось бы гораздо больше энергии. Вторичному рециклингу могут быть подвергнуты все полимерные материалы, которые не годятся для рециклинга первичного. Переработка, как правило, начинается с дезинтеграции материала, в результате чего получают чипсы, гранулы, крошка или порошок. Затем термопластичные

полимеры перерабатываются в изделия обычными для них способами, например, литьем под давлением. Отходы термореактивных смол, сшитых и наполненных полимеров в измельченном виде применяются в качестве наполнителей в новых композиционных материалах. Так, например, резиновую крошку, полученную дроблением изношенных автомобильных шин, вводят в состав дорожных асфальто-бетонных покрытий, строительных бетонов и пр. Однако вторичный рециклинг, строго говоря, не решает проблему утилизации полимерных отходов, а лишь откладывает ее решение на более поздний период, т. к. изделия, полученные из вторичного сырья, рано или поздно сами станут трудно перерабатываемыми отходами.

Третичный рециклинг полимерных отходов связан с их химической переработкой, поэтому его можно назвать химическим рециклингом. В результате химического рециклинга полимер разрушается до своих структурных блоков (мономеров) или других низкомолекулярных веществ, из которых затем могут быть получены новые полимеры или другая ценная химическая продукция. Химический рециклинг не предоставляет выигрыша в энергии по сравнению с производством полимерных материалов из первичного сырья, поэтому с точки зрения традиционной линейной экономики он не выгоден. Однако он позволяет в полной мере реализовать принцип замкнутого использования материальных ресурсов, являющийся краеугольным камнем циркулярной экономики – новой, набирающей силу парадигмы промышленно развитых стран, призванной обеспечить устойчивое развитие цивилизации с минимальным уроном окружающей среде.

К методам химического рециклинга следует, в первую очередь, отнести деполимеризацию высокомолекулярных соединений до исходных низкомолекулярных веществ или мономеров, из которых затем заново может быть синтезирован тот же полимер. Это метод успешно применяется для ряда гетероцепных полимеров, например, полиэтиленгликольтерефталата. Однако деполимеризацию карбоцепных полимеров, отличающихся большой прочностью химических связей, осуществить трудно. С другой стороны, сложности возникают и при попытках селективно разрушить поперечные связи между макромолекулами в сшитых полимерных матрицах с целью облегчения их дальнейшей переработки. Примером может служить девулканизация резины с получением т. н. регенерата. В процессе разрушения вулканизационной сетки из сульфидных связей частичной деструкции подвергаются и молекулы каучука, что не позволяет в дальнейшем получать на основе регенерата изделия, например, автомобильные шины, не уступающие по качеству продукции из первичной резины.

Наиболее универсальными методами химического рециклинга полимерсодержащих отходов являются пиролиз и сольволиз. Пиролиз при высоких температурах приводит к выделению большого количества газов и образованию жидких фракций сложного состава. Поэтому в большинстве научных работ исследуется возможность использования продуктов пиролиза в качестве моторного или котельного топлива, что в конечном счете сводит переработку полимерных отходов к сжиганию с присущими ему недостатками, обсуждавшимся выше.

Сольволиз подразумевает обработку полимерных материалов растворителями при повышенных температурах, что приводит к деструкции химических связей, как и при пиролизе. Однако по сравнению с пиролизом сольволиз имеет ряд существенных преимуществ: меньше температуры процесса и температурные градиенты в реакционной среде, в результате чего уменьшаются перегревы и снижается газообразование; разбавитель подавляет вторичные реакции конденсации и полимеризации, приводящие к твердым продуктам; возможно получение индивидуальных химических соединений с высоким выходом. Сольволиз предоставляет широкие возможности при переработке полимеров различной природы за счет варьирования природы растворителя, температуры, давления, применения катализаторов, проведения процесса в докритических или сверхкритических условиях. Не случайно сольволиз считается лучшим способом переработки отходов углепластиков: обработка их растворителями при температурах около 350°C позволяет разложить связующую термореактивную смолу до растворимого состояния с получением низкомолекулярных продуктов, имеющих химическую ценность, а также извлечь дорогостоящие высокомолекулярные углеродные волокна в чистом виде практически без потери физико-механических свойств [3].

При изучении термического сольволиза изношенных автомобильных шин в Белорусском государственном технологическом университете было установлено, что изменяя природу растворителя и температуру обработки можно варьировать в широких пределах фракционный и химический состав жидких продуктов термолиза резины. При этом практически не образуется газообразных и вторичных твердых продуктов (кокса). Последнее обстоятельство позволяет извлекать из резиновых отходов технический углерод с высокой удельной поверхностью, пригодный для повторного применения в качестве высокодисперсного наполнителя полимерных матриц. В ходе исследований, регулируя окислительно-восстановительные свойства среды, удалось подобрать условия, при которых из одной и той же резины на основе каучука СКИ-3 можно получать с высоким выходом лимонен либо

*n*-цимол, каждый из которых может представлять интерес в качестве сырья для нефтехимии.

Таким образом, химический рециклинг полимеров как метод переработки отходов наилучшим образом соответствует принципам экономики замкнутого цикла, являющейся неотъемлемой частью назревающей Четвертой промышленной революции. Среди методов химического рециклинга сшитых высоконаполненных полимерных материалов наиболее перспективным, по нашему мнению, является термический сольволиз в силу своей универсальности, гибкости и энергетической эффективности.

### Литература

1. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. 2017. Vol. 3, No. 7. Art. No. e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.

2. The new plastics economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action [Электронный ресурс] / The Ellen MacArthur Foundation. URL: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/NPEC-Hybrid\\_English\\_22-11-17\\_Digital.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/NPEC-Hybrid_English_22-11-17_Digital.pdf) (дата обращения: 03.10.2018).

3. Jobs S., Leeke G.A., Mativenga P.T., Oliveux G., Pickering S., Shuiab N.A. Composites recycling: Where are we now? [Электронный ресурс] / <https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Recycling%20Report%202016.pdf> (дата обращения: 07.09.2019).

УДК 001-051:378

**Никоненко Н.А., Сутурин А.К.**

(ГУ «Белорусский институт системного анализа  
и информационного обеспечения научно-технической сферы»)

### **ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ КАДРОВ ВЫСШЕЙ КВАЛИФИКАЦИИ ДЛЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА БЕЛАРУСИ**

В Беларуси подготовка научных работников высшей квалификации (НРВК) осуществляется в системе аспирантуры и докторантуры. Для целей планирования и контроля подготовки НРВК, а также обеспечения органов государственного управления оперативной информацией о состоянии послевузовского образования создана республиканская система мониторинга подготовки НРВК [1]. Информационно-аналитическое