

ПРИНЦИПЫ «GREEN ENGINEERING» – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПУТЬ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПОЛИМЕРАМИ

Ключевые слова: загрязнение окружающей среды, полимеры, биоразлагаемые полимеры, зеленая химия, зеленая инженерия.

Выявлено влияние полимеров на загрязнение окружающей природной среды, проанализированы и раскрыты принципы зеленой инженерии как методологической основы химической технологии.

Keywords: pollution, polymers, biodegradable polymers, green chemistry, green engineering.

The effect of polymers on the pollution of the environment are revealed, the principles of green engineering as a methodological basis of Chemical Technology are analyzed and disclosed.

В начале XXI века ученые всего мира все больше стали говорить о глобальных экологических проблемах. Связано это с увеличением выбросов и сбросов вредных веществ, истощением материальных и энергетических ресурсов, увеличением выброса парниковых газов (по последним данным, на 60% выше нормы) и, как следствие, изменением климата. Последнее вызывает не только линейное повышение глобальной температуры с экстремальными метеорологическими последствиями и повышение уровня моря, но и нелинейные хаотические изменения, которые по своей природе непредсказуемы и могут быть катастрофическими. Достаточно сказать, что многие ученые рассматривают экологическую проблему достаточно серьезно, чтобы говорить о XXI веке как «заключительном столетии человечества».

Свой «вклад» в загрязнение окружающей среды вносят полимеры и композиты. Очевидно, что производство и использование полимеров, как и большинство производственных процессов, связано с выбросами углекислого газа. Кроме того, многие процессы, связанные с полимерами, выделяют летучие органические соединения, которые являются парниковыми газами и могут привести к другим экологическим проблемам, таким, как прямая токсичность и образование фотохимического смога. То же самое касается растворителей, многих добавок, пенообразователей. Является ли все это составляющими экологического «кризиса», в конечном счете, вопрос терминологии.

За последние 50 лет возросло использование полимеров, композитов и адгезивов. Конечно, замена традиционных материалов на синтетические пластики имеет очевидные преимущества: простота производства, экономия электроэнергии, возможность получения изделий с необходимыми качествами и др. В качестве примера можно привести «солнцемобиль» серии Nupa, имеющий углепластиковый кузов, литий-полимерные аккумуляторы, который проезжает расстояние в 3000 км со средней скоростью более 90 км/ч. Но экологические проблемы остаются.

Можно ли сократить воздействие полимеров на окружающую среду?

В инженерной практике существуют так называемые «зеленые принципы». В 1998 году П. Анастас и Дж. Уорнер в книге «Зеленая химия: Теория и практика» [1] сформулировали 12 принципов Зеленой химии. Эти принципы отражают деятельность научного сообщества, промышленности и государственных органов, направленную на снижение или устранение использования опасных материалов и химических процессов. Зеленая химия делает акцент на предотвращении загрязнений на самых начальных стадиях планирования и осуществления химических процессов.

Определение «зеленой» химии, принятое Международным союзом теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), гласит: «Зеленая химия – это открытие, разработка и применение химических продуктов и процессов, уменьшающих или исключаящих использование и образование вредных веществ». Основная идея Зеленой химии заключается в снижении или полном устранении образования ядовитых химических отходов, минимизации использования в процессах синтеза опасных для человека и окружающей природной среды опасных материалов, в использовании, где возможно, возобновляемого сырья. В настоящее время доказано, что экологически благоприятные альтернативы технологиям также экономически выгоднее и функциональнее токсичных традиционных аналогов. Когда опасные материалы выводятся из производства, все затраты, связанные с этими соединениями, также отпадают, что ведет к значительному снижению расходов на обработку токсичных материалов, их транспортировку, утилизацию и соответствие техническим условиям.

Конечно, сама по себе Зеленая химия не может создать новую технологию, она лишь указывает путь движению современной науки. Эти принципы, скорее, следует рассматривать в качестве руководящих принципов, которые позволят улучшить экологические характеристики инженерных проектов.

В 2003 году П. Анастас и Дж. Циммерман в книге «Design through the 12 principles of green engineering» представили принципы зеленой инженерии. Green Engineering – это проектирование и производство продуктов, направленные на

сохранение природных ресурсов и ведущие к цели устойчивого развития. Таким образом, данные принципы призваны обеспечить основу для деятельности ученых и инженеров, участвующих в разработке новых материалов, изделий, процессов и систем, которые являются «доброкачественными» для здоровья человека и окружающей среды. Широта применимости принципов имеет важное значение: это и строительство, и химическая промышленность, и производство автомобилей, потребительских товаров и устройств, и т.д.

Рассмотрим принципы Green engineering.

1. *«Неотъемлемый, а не случайный»*. Проектировщики должны стремиться гарантировать, что все затрачиваемые и выделяемые материалы и энергия, по своей сути, так максимально безопасны, насколько это возможно.

Многие промышленные исходные материалы относятся к разряду опасных, и продукция из них неизбежно будет токсичной и вызывать экологические проблемы. Поэтому при разработке новых продуктов необходимо оценить свойства выбранного материала (токсикологические и физико-химические свойства) и рассчитать необходимые затраты энергии. Разработчики должны разрабатывать методы и технологические инновации для создания продуктов, неопасных по своей природе для человека и окружающей среды. В идеале следует использовать менее опасные материалы и реагенты, тем самым уменьшая риски воздействия на окружающую среду, стоимость мониторинга и контроля за загрязнениями окружающей среды в результате отказа от продуктов, образующих отходы.

2. *«Профилактика вместо лечения»*. Лучше предотвратить образование отходов, чем их перерабатывать или утилизировать.

Отходы образуются тогда, когда процессы или системы не в состоянии эффективно использовать материалы или энергию. Естественно, когда мы используем энергию в производстве продуктов, эта энергия поглощается и энтропия уменьшается. При использовании продуктов энтропия увеличивается, а продукты распадаются и превращаются в отходы. «Зеленые химики» указывают, что понятие «отходы» является «достоянием» человечества. В природе не существует таких свойств энергии или материалов, которые неизбежно превращают их в отходы. Образование отходов можно избежать или предотвратить по мере возможностей, используя безотходные технологии.

3. *«Разработка процедур разделения и очистки»*. Должны быть разработаны процедуры разделения и очистки, чтобы минимизировать использование материалов и потребление энергии.

Традиционные технологические производственных процессов разделения продуктов и очистки токсичными растворителями до сих пор требуют огромного количества энергии. Тепло и давление применяется в большинстве обычных процессов, что увеличивает потребность в энергии. Эту тенденцию можно изменить и снизить

потребление энергии, включая разделение и очистку в этот процесс. В химической промышленности и в лабораториях разделение и очистка на молекулярном уровне осуществляются с помощью ректификации и колоночной хроматографии. Оба метода являются энергоемкими и требуют большого количества токсичных растворителей. Проектирование самостоятельного разделения и очистки продуктов в реакционной среде является желанной технологией. Добавление полимеров в реакционную среду может быть очень полезным в данном процессе. Созданные полимеры могут контролировать растворимость субстратов, а лиганды и катализаторы могут использоваться для разделения и повторного использования

4. *«Максимальное увеличение эффективности»*. Продукты, процессы и системы должны быть спроектированы таким образом, чтобы максимизировать массу, энергию, пространство и эффективность по времени.

Эффективность очень важна в каждом производственном процессе и имеет экономический смысл. Материалы, энергия, время и пространство – важные переменные, которые необходимо принимать во внимание при разработке промышленных процессов. Большие циклические реакторы в химическом производстве являются типичным примером того, что называют сейчас старой технологией. Более эффективными считаются непрерывные проточные микрореакторы, которые работают с очень маленькими объемами и при интенсивном перемешивании, они автоматизированы и высоко производительны. Кроме уменьшения масштабов химического производства, это приведет к появлению эко-промышленных производств в городах со свободным доступом для рабочих (меньше зависимость от автомобилей, меньше пригородное разрастание, меньше затрат времени).

5. *«Увеличение производительности без увеличения затрат»*. Увеличение энергии или сырья может увеличить выход продукции, но то же самое может быть достигнуто применением новых технологий.

Химики и инженеры-химики знают по опыту, что химическая реакция или преобразование, осуществляющиеся при повышении температуры, давления или концентрации вещества, обеспечивают более высокий выход целевого продукта (в соответствии с принципом Ле-Шателье). Инженеры-химики в их желании увеличить выход производственной реакции добавляют больше энергии (тепла, давления) или исходного вещества, чтобы сдвинуть равновесие и получить желаемый результат. Примером на молекулярном уровне, который может описать химические превращения, является реакция конденсации с выделением воды. Чтобы увеличить выход реакции, вода устраняется из потока продукции и, следовательно, реакция доводится до конца без дополнительной энергии или вещества. В соответствии с новым мышлением «green engineering», преобразования должны происходить

без дополнительной энергии и материалов при предварительном планировании производственных систем. Еще одним важным аспектом производственных процессов является производство «только в срок», что означает, что продукция должна производиться для удовлетворения спроса конечного потребителя (конечный покупатель продукта) своевременно, точного количества и качества. Хорошее планирование производственных систем для получения продукта поможет избежать отходов, связанных с перепроизводством, ожиданием, обработкой, инвентаризацией и исходными ресурсами.

6. «*Сохранение сложности*». Внутренняя энтропия и сложность продукта должны рассматриваться в качестве инвестиций при принятии проектных решений относительно утилизации, повторного использования или выгодного размещения.

Это еще один очень важный аспект производства продукции с заданной сложностью. Чем выше сложность продукта, тем выше расходы на материалы, энергию и время. Хорошим примером могут служить компьютерные чипы, которые имеют значительный заданный уровень сложности. При переработке кремниевых чипов невозможно эффективным способом восстановить исходный материал. В то же время у бумажного пакета сложность очень низкая, но при этом ценность продукта и его материалы не оправдывают энергию для сбора, переработки и вторичного производства этого продукта. «Зеленые инженеры» должны думать еще на стадии проектирования о конце срока службы продукта. Очень важно, чтобы решения о переработке, повторном использовании или утилизации продукта были основаны на том, из чего он изготовлен и насколько сложен.

7. «*Устойчивость, а не бессмертие*». Запланированная устойчивость, а не «бессмертие» должна быть целью проектирования.

Желательно, чтобы продукты были хорошо изготовлены и устойчивы в течение срока их коммерческой эксплуатации, но не были стойкими и не приводили к проблемам окружающей среды. Эти два свойства, долговечность и стойкость после использования – противоположны и должны быть сбалансированы на стадии проектирования «зелеными инженерами». Разработка должна быть направлена на продукты, которые являются достаточно прочными, чтобы выдерживать условия эксплуатации в течение своей жизни и избежать преждевременной утилизации. Эффективное техническое обслуживание и ремонт изделия без добавления новых материалов является преимуществом. «Бессмертие» или устойчивость к условиям окружающей среды после захоронения – это нежелательные свойства, потому что вследствие биоаккумуляции могут быть опасны для живых организмов. Очень хорошим примером этого являются одноразовые подгузники. Устойчивость является очень важным свойством, и производители предпочитают некоторые материалы, особенно небiorазлагаемые полимеры (полистирол).

Утилизация подгузников сейчас является одной из наиболее важных экологических проблем для свалок твердых бытовых отходов. «Зеленые химики» после долгих исследований предложили решение: экологичные упаковочные материалы на основе крахмала, которые можно легко растворить в воде. В последние несколько лет на рынке появились подгузники, которые могут быть очищены и повторно использоваться много раз.

Одноразовые пластиковые пакеты, которые каждый сейчас использует в быту, стали международной экологической проблемой, связанной с сохранностью пластика в воде. Полимеры, изготовленные из материалов на биологической основе, являются новой зеленой инициативой химии, которые заменяют синтетические полимеры. Полимолочная кислота, или полилактид, представляет собой термопластичный алифатический полиэфир, получаемый из возобновляемых ресурсов, таких, как кукурузный крахмал, корни тапиоки или сахарный тростник. Молочная кислота производится бактериальной ферментацией крахмала. Полимолочная кислота является продуктом «зеленой химии», может разлагаться при определенных условиях (в присутствии кислорода), но тяжело перерабатывается.

8. «*Удовлетворение потребностей, сокращение излишеств*». Разработку ненужных процессов или возможностей решения нужно считать недостатком проекта.

Глобальная экономическая конкуренция последних десятилетий вызвала новые технологические достижения в производстве самых разнообразных потребительских товаров. Хотя новые технологии направлены на удовлетворение большей части потребительских потребностей человека и социальных устремлений, она способствует также многим излишества, отходам и деградации окружающей среды. Новые материалы, природные ресурсы, энергия и технологии во многих промышленно развитых странах были потрачены впустую для получения необычных возможностей различных продуктов. Многие продукты после их использования стали причиной экологических проблем в виде отходов из-за своей сложности, высокой устойчивости и трудностей в переработке. Хорошим примером является дезинфекция питьевой воды хлором. Технология очень полезна для защиты здоровья человека. Однако централизованное расположение станций обеззараживания способствует образованию избытка хлора в питьевой воде для близко расположенных к ним пользователей и снижению качества дезинфекции для отдаленных. Альтернативой может быть установка на этих станциях системы привода и управления для регулирования дозы хлорреагентов. Химическая промышленность может применять новые стратегии по ограничению материалов, энергии и других реагентов, используя ферменты в качестве катализаторов, которые работают более безопасно.

9. *«Сокращение до минимума разнообразия компонентов».* Сокращение состава компонентов в продуктах увеличивает возможность полезного повторного использования или переработки.

Большинство потребительских товаров сегодня (автомобили, электрическое и электронное оборудование, упаковка пищевых продуктов и т.д.) сделаны таким образом, что включают в себя несколько компонентов. Даже пластмассы содержат множество других химических веществ, таких, как пластификаторы, красители, стабилизаторы, антипирены. Эти дополнительные химикаты и в целом материальное разнообразие продуктов улучшают их свойства и полезные функции. Но когда эти продукты достигают конца своего жизненного цикла, они вызывают ряд проблем при разложении, повторном использовании или вторичной переработке. Некоторые изделия могут быть изготовлены из одного материала, а не двух или трех. Хорошим примером является новая технология, которая применяется при производстве пластика для автомобилей. Различные формы полимера могут иметь различные свойства и использоваться для изготовления дверей и приборных панелей (такими свойствами обладают, например, полиолефины). На молекулярном уровне примером являются однореакторные процессы и каскадные реакции, заменяющие многоступенчатую реакцию синтеза в органической химии.

10. *«Объединение местных потоков энергии и вещества».* При проектировании продуктов, процессов и систем необходимо учитывать имеющиеся потоки энергии и материалов.

Промышленная продукция и процессы должны использовать местные и существующие потоки энергии и сырья, таким образом они могут свести к минимуму необходимость их импорта и транспортировки из отдаленных мест. Кроме того, на местном уровне они могут обмениваться теплом от других промышленных установок, если имеются экзотермические операции. Побочные продукты из одной промышленной установки могут стать сырьем для последующих процессов и реакций на других промышленных предприятиях. В индустриальных парках отходы и энергия могут быть использованы на всем протяжении производственной линии и включены в другие процессы и другие конечные продукты.

11. *«Разработка для коммерческой «второй» жизни».* Продукты, процессы и компоненты, которые сохраняют «работоспособность», могут быть восстановлены и использованы повторно.

Многие коммерческие продукты, процессы и системы после достижения окончания срока их службы устаревают и должны быть выброшены в виде отходов. «Зеленые инженеры» должны учитывать это при проектировании. В целях сокращения отходов некоторые компоненты или материалы до тех пор, пока они остаются в рабочем состоянии, могут использоваться повторно или

перерабатываться в сырье для других продуктов. Таким образом можно сэкономить много материалов и энергии. Мобильные телефоны, компьютеры, электрооборудование, принтеры, другая электронная техника в офисах или домах быстро устаревают и должны заменяться на современные. Проектирование продукции с тем, чтобы часть компонентов могла быть восстановлена, значительно бы уменьшило количество отходов, энергии и материалов для будущих продуктов. Коммерческая «вторая» жизнь является частью «зеленого» проектирования новых продуктов. Существует много хороших примеров электрических приборов и электронной техники, которые имеют конец срока эксплуатации и конструктивные особенности, благодаря которым их можно разобрать на составляющие, переработать или повторно использовать после технического обслуживания и небольшого ремонта. Так, принтеры Xerox сконструированы таким образом, что после коммерческого использования, они могут быть переделаны или восстановлены. Другие крупные промышленные компании также используют разработки «зеленой инженерии» в производствах своих продуктов для возможности использования их после незначительного ремонта или повторной переработки (AT&T, General Electric, IBM, Procter&Gable и т.д.).

В последнее десятилетие произошел серьезный сдвиг в том, как промышленные производители изменяют производство своих продуктов с целью снижения их влияния на окружающую среду после окончания срока жизни. Анализ жизненного цикла продукта на различных стадиях стал обычным методом в проектировании. «Жизнь» продукта от исходных материалов, производства до утилизации анализируется в аспекте его количественного воздействия на окружающую среду и природные ресурсы. Она рассматривается в цикле: проектировщик – производитель – поставщик – клиент – конец срока службы. Программы, касающиеся жизненного цикла продукта, связаны с инженерными задачами, материалами и энергией, но также могут предусматривать маркетинговые мероприятия и разработку новых продуктов.

12. *«Возобновляемые, а не истощаемые».* Материальные и энергетические ресурсы должны быть возобновляемыми, а не истощаемыми.

20-й век характеризовался быстрым экономическим ростом, что не могло не привлечь внимание к природным ресурсам и источникам энергии. Это и стало основной причиной для увеличения загрязнений окружающей среды и истощения ценных природных ресурсов. Ученые и технологи считают, что человеческая цивилизация не может продолжать свой путь к материальному благополучию без возобновляемых ресурсов. Устойчивость в опасности, и общество может потерпеть крах от недостатка природных ресурсов. Возобновляемые природные ресурсы, которые имеют возможность восстанавливаться посредством биологических или других естественных процессов,

могут быть использованы в устойчивых циклах без повреждающих воздействий, но даже в этой ситуации есть пределы. Возобновляемыми природными ресурсами (материальными и энергетическими) нужно осмотрительно управлять, чтобы избежать превышения их способности к восстановлению. Возобновляемость природных ресурсов и надлежащее их использование являются ключевыми для устойчивого развития и охраны окружающей среды.

В качестве возобновляемых природных ресурсов рассматриваются: все биологические материалы (биомасса), солнечная энергия, геотермальная энергия, приливы и любые природные элементы, которые восполняются со временем. На другой чаше весов истощаемые природные ресурсы (которые более дешевы и широко используются в настоящее время), такие как уголь, природный газ, нефть (ископаемое топливо), минералы, сельскохозяйственные земли, моря, пресная вода и т.д.

12 принципов «green engineering» охватывают некоторые из наиболее важных промышленных процессов и технологических вопросов. Эти принципы – не список целей, а набор важных методологий, которые должны измениться, чтобы достичь этих целей и содействовать устойчивому развитию. Образование инженеров и изменения во взглядах и методах старых

специалистов являются ключевыми компонентами для «зеленого» проектирования и инновационных альтернатив. Новые инженеры должны быть образованными и подготовленными для системной интеграции 12 принципов в молекулярное проектирование, разработку продуктов, процессов и методов производства в интересах общества и окружающей среды. Старые способы производства должны быть изменены. В связи с этим необходимо пересмотреть проблемы устойчивости, возобновляемого сырья, новых источников энергии и стратегий в целях удовлетворения потребностей, и в то же время защиты окружающей среды. Нужны новые образовательные программы подготовки инженеров-технологов для чистых «зеленых» производств.

Литература

1. P.T.Anastas, J.C. Warner. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, New York, 1998.
2. P.T.Anastas, J.B.Zimmerman, Environmental Science & Technology, 37, 5, 94-101 (2003).
3. В.К.Хасанова, Н.В.Шильникова, Вестник Казанского технологического университета, 15, 2, 76-78 (2012).
4. Е.В.Приймак, Вестник Казанского технологического университета, 15, 6, 203-206 (2012).