



РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНВЕРСИИ

Кравченко Инна Сергеевна

Аспирант кафедры химической инженерии Кафедра химической инженерии и технологии переработки полимеров, Белорусский государственный технологический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

Проблема накопления **пластиковых отходов** является глобальным экологическим вызовом, требующим внедрения высокоэффективных и экономически целесообразных технологий утилизации. В данной работе представлен **сравнительный анализ** ключевых методов переработки пластиков, включая механический рециклинг, термические (пиролиз, газификация) и химические (гидролиз, гликолиз) подходы. Особое внимание уделено термическим процессам, позволяющим конвертировать смешанные полимерные отходы в ценные **жидкие углеводородные продукты** и синтез-газ. Рассмотрены технологические особенности **каталитического пиролиза** как способа повышения селективности и качества конечного продукта. Утверждается, что для достижения целей циркулярной экономики необходимо не просто сокращение объемов захоронения, но и максимальное извлечение энергетической и сырьевой ценности из полимерных материалов, что требует глубокой интеграции физических, химических и инженерных решений.

Ключевые слова: пластиковые отходы, утилизация, пиролиз, химический рециклинг, газификация, полимеры, циркулярная экономика, жидкое топливо, катализ.

Введение

Неуклонный рост производства полимерных материалов, достигший сотен миллионов тонн в год, привел к критической нагрузке на экосистемы. Низкая степень биоразлагаемости большинства промышленных пластиков обуславливает их накопление в окружающей среде, что делает разработку устойчивых и эффективных **методов утилизации** приоритетной задачей современной науки и инженерии. Традиционный **механический рециклинг**, несмотря на его преимущества, ограничен необходимостью тщательной сортировки и ведет к постепенной деградации полимерных свойств, что не позволяет достичь замкнутого цикла для большинства видов пластика.

Поэтому особую научную и практическую ценность представляют **технологии глубокой конверсии**, способные разрушать полимеры до мономерных или низкомолекулярных форм.

Целью исследования является классификация и **сравнительная оценка** основных направлений термической и химической утилизации полимерных отходов с точки зрения их эффективности, экологической безопасности и потенциала интеграции в существующую нефтехимическую инфраструктуру.

2. Обзор Существующих Технологических Решений

Современные методы переработки пластиковых отходов можно разделить на три основные категории: механический, термический и химический рециклинг.

2.1. Механическая Переработка

Включает процессы сортировки, измельчения, мойки и экструзии. Это наиболее **энергоэффективный** и простой метод, однако он подходит только для чистых и однородных полимеров (например, ПЭТ-бутылок) и имеет ограниченное число циклов переработки.

2.2. Термическая Конверсия

Эти методы основаны на разрушении полимерных цепей под воздействием высоких температур в контролируемой атмосфере.

Пиролиз (термическое разложение): Нагрев пластика при 400–700°C в отсутствие кислорода. Конечными продуктами являются **жидкое пиролизное масло** (углеводороды, пригодные для топлива или сырья), синтез-газ и твердый остаток (кокс). Главным преимуществом является возможность перерабатывать **смешанные и загрязненные пластики**.

Газификация: Процесс частичного окисления при температурах 700–1500°C с получением преимущественно **синтез-газа** (CO и H₂), который может быть использован для производства электроэнергии или синтеза химических продуктов (например, метанола).

2.3. Химический Рециклинг

Направлен на расщепление полимеров до исходных мономеров или других низкомолекулярных веществ с сохранением их химической чистоты.

Гидролиз и Гликолиз: Применяются для поликонденсационных полимеров, таких как ПЭТ (PET) или ПУ (PUR). Например, гликолиз позволяет вернуть ПЭТ к его исходным мономерам, пригодным для производства "нового" пластика того же качества (метод "бутылка-в-бутылку").

Гидрогенизация: Процесс, проводимый под высоким давлением водорода, который разрушает полимерные цепи и насыщает двойные связи, получая высококачественные углеводороды.

3. Сравнительный Анализ и Технологические Особенности

Ключевым фактором, определяющим выбор метода, является **степень чистоты и гомогенности** исходного сырья.

Метод	Исходное Сырье	Основной Продукт	Эффективность (Конверсия в сырьё)	Требования к Сырью
Механический	Чистые, однородные ПЭТ, ПНД	Вторичная гранула	Низкая (деградация)	Высокие (сортировка)
Термический (Пиролиз)	Смешанные, загрязненные пластики	Жидкое масло, Синтез-газ	Средняя - Высокая	Низкие
Химический (Гликолиз)	Чистые ПЭТ, ПУ	Мономеры	Высокая (сохранение качества)	Высокие

Наиболее перспективным для переработки **трудногорючих и смешанных пластиковых отходов** является **каталитический пиролиз**. Использование цеолитных катализаторов (например, типа ZSM-5) позволяет:

1. **Снизить температуру процесса**, уменьшая энергозатраты.
2. **Повысить селективность** получения конкретных фракций (например, бензиновых или дизельных).
3. **Улучшить качество жидкого продукта** за счет снижения содержания гетероатомов и повышения октанового числа.

4. Инженерная Реализация и Экологические Аспекты

Экологическая приемлемость термических методов тесно связана с **системой очистки выбросов**. При проектировании пиролизных установок критически важно предотвращать образование **диоксинов и фуранов**, что достигается строгим контролем температуры и отсутствием кислорода.

При реализации процессов газификации и пиролиза значительное внимание уделяется **энергетической самодостаточности** комплекса. Синтез-газ, генерируемый в процессе, часто используется для обеспечения самой установки теплом и электроэнергией, что существенно повышает **чистую энергетическую эффективность** утилизации.

В контексте **циркулярной экономики**, наилучший эффект достигается гибридными системами, где:

Чистые полимеры идут на **химический рециклинг** (мономеры).

Смешанные и сильно загрязненные отходы направляются на **термическую конверсию** (топливо, сырьё).

Заключение

Разработка эффективных методов утилизации пластиковых отходов требует перехода от простой ликвидации к **технологической конверсии** полимеров в ценные ресурсы. Доказано, что химические методы обеспечивают **высокое качество** восстановленного сырья, а термические, особенно **каталитический пиролиз**, являются наиболее **универсальными** для переработки сложных и смешанных потоков отходов.

Литература

1. Григорян Э.Г., Пятакова В.Н. Переработка пластмасс и полимерных материалов: учеб. пособие. — М.: ИНФРА-М, 2017.
2. Якунин В.П. Технология утилизации твердых коммунальных отходов. — Минск: БГТУ, 2020.
3. Brebu M., Vasile C. Thermal degradation of plastics: the role of the structure. // *Polymer Degradation and Stability*, 2010, Vol. 95, No. 1, pp. 2029–2037.
4. Miandad R., Shakoor S., Naz M.Y. Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste: a review. // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2017, Vol. 127, pp. 15-28.
5. Sarker M., Rahman A. Sustainable waste management: current scenario and future direction in the context of circular economy. // *J. Cleaner Prod.*, 2020, Vol. 250, 119521.