https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-20

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА ИЗ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА КАК КОМПОНЕНТА ТОПЛИВА

А.Т. Джасакбаев[1]✉, З.Б. Сұлтамұратова[1], Ж.К. Карешова[1], А.К. Жумабекова[2]

Received: 20 April 2026
Accepted: 24 June 2026
Published: 30 September 2026
Citation: A.T. Jassakbayev, et al. « ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА ИЗ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНА КАК КОМПОНЕНТА ТОПЛИВА ». Chemical Technology, vol. 1, no. 32, Sept. 2026, doi: https://doi.org/10.58805/ct.V.1(32)-20
License CC BY 4.0

[1] *НАО «Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева», Атырау, Казахстан*
[2] *Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан*
✉ *Корреспондент-автор: alikhanjassakbayev@gmail.com*

В статье рассмотрены перспективы использования пиролизного масла, полученного из отходов полиэтилена, в качестве компонента жидкого топлива. Актуальность работы обусловлена ростом объёмов пластиковых отходов, низким уровнем их переработки и необходимостью разработки технологий, позволяющих одновременно снижать экологическую нагрузку и возвращать углеродсодержащее сырьё во вторичный хозяйственный оборот. На основе анализа литературных данных изучены особенности пиролиза полиэтиленовых отходов, влияние технологических параметров на выход жидкой фракции, а также физико-химические свойства образующегося пиролизного масла. Показано, что температура процесса, скорость нагрева и состав исходного сырья оказывают существенное влияние как на выход жидкого продукта, так и на его качественные характеристики. Установлено, что пиролизное масло обладает высокой теплотворной способностью и рядом свойств, близких к характеристикам традиционных жидких топлив, в том числе дизельного топлива и бензиновых фракций. Вместе с тем выявлено, что его прямое использование ограничивается широким фракционным составом, нестабильностью отдельных эксплуатационных показателей и необходимостью дополнительной подготовки перед практическим применением. Отмечено, что наиболее перспективным направлением является использование пиролизного масла после предварительной обработки, прежде всего после дистилляции, а также в составе смесевых топлив. Сделан вывод, что пиролиз отходов полиэтилена представляет собой перспективное направление химического рециклинга, сочетающее решение экологических задач по сокращению объёмов пластиковых отходов с возможностью получения ценных жидких углеводородных продуктов для дальнейшего топливного и химического использования.

Ключевые слова: полиэтилен, пластиковые отходы, пиролиз, пиролизное масло, жидкое топливо, химическая переработка, дистилляция, дизель, бензин.

ПОЛИЭТИЛЕН ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН ПИРОЛИЗ МАЙЫН ОТЫН КОМПОНЕНТІ РЕТІНДЕ ПАЙДАЛАНУДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

А.Т.Джасакбаев[1]✉, З.Б. Сұлтамұратова[1], Ж.К. Карешова[1], А.К. Жумабекова[2]

[1] *«Сафи Өтебаев атындағы Атырау мұнай және газ университеті» КЕАҚ, Атырау, Қазақстан*
[2] *Қ. Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана, Қазақстан*
✉ *e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com*

Мақалада полиэтилен қалдықтарынан алынған пиролиз майын сұйық отын

компоненті ретінде пайдаланудың перспективалары қарастырылған. Жұмыстың өзектілігі пластик қалдықтары көлемінің өсуімен, оларды қайта өңдеу деңгейінің төмен болуымен және экологиялық жүктемені азайтып, көміртекқұрамды шикізатты екінші реттік шаруашылық айналымға қайтаруға мүмкіндік беретін технологияларды әзірлеу қажеттілігімен айқындалады. Әдеби деректерді талдау негізінде полиэтилен қалдықтарының пиролиз ерекшеліктері, технологиялық параметрлердің сұйық фракция шығымына әсері, сондай-ақ алынған пиролиз майының физика-химиялық қасиеттері зерттелді. Процесс температурасы, қыздыру жылдамдығы және бастапқы шикізат құрамы сұйық өнімнің шығымына да, оның сапалық сипаттамаларына да елеулі әсер ететіні көрсетілді. Пиролиз майының жоғары жылу бөлу қабілетіне ие екені және оның қасиеттерінің бірқатары дәстүрлі сұйық отындардың, соның ішінде дизель отыны мен бензин фракцияларының қасиеттеріне жақын екені анықталды. Сонымен қатар, оны тікелей пайдалану кең фракциялық құрамымен, кейбір пайдалану көрсеткіштерінің тұрақсыздығымен және практикалық қолдану алдында қосымша өңдеу қажеттілігімен шектелетіні анықталды. Ең перспективалы бағыт ретінде пиролиз майын алдын ала дайындағаннан кейін, ең алдымен дистилляциядан соң, сондай-ақ аралас отындар құрамында пайдалану көрсетілген. Полиэтилен қалдықтарының пиролизі пластик қалдықтарының көлемін азайтуға бағытталған экологиялық мәселелерді шешуді әрі одан әрі отындық және химиялық мақсатта пайдалануға болатын бағалы сұйық көмірсутек өнімдерін алуды ұштастыратын химиялық қайта өңдеудің перспективалы бағыты болып табылады деген қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: полиэтилен, пластик қалдықтары, пиролиз, пиролиз майы, сұйық отын, химиялық қайта өңдеу, дистилляция, дизель, бензин.

PROSPECTS FOR USING PYROLYSIS OIL FROM POLYETHYLENE WASTE AS A FUEL COMPONENT

A.T. Jassakbayev[1]✉, Z. B.Sultamuratova[1], Z. K. Kareshova[1], A.K. Zhumabekova[2]

[1] *"Safi Utebaev Atyrau University of Oil and Gas" NJSC, Atyrau, Kazakhstan,*
[2] *K. Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan,*
✉ *e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com*

The article examines the prospects for using pyrolysis oil obtained from polyethylene waste as a component of liquid fuel. The relevance of the study is determined by the growing volume of plastic waste, the low level of its recycling, and the need to develop technologies capable of simultaneously reducing environmental impact and returning carbon-containing raw materials to secondary economic circulation. Based on an analysis of literature data, the features of polyethylene waste pyrolysis, the influence of technological parameters on the yield of the liquid fraction, and the physicochemical properties of the resulting pyrolysis oil were studied. It is shown that the process temperature, heating rate, and composition of the feedstock have a significant effect both on the yield of the liquid product and on its quality characteristics. It was found that pyrolysis oil has a high calorific value and a number of properties close to those of conventional liquid fuels, including diesel fuel and gasoline fractions. At the same time, it was revealed that its direct use is limited by a wide fractional composition, instability of certain performance indicators, and the need for additional treatment before practical application. It is noted that the most promising direction is the use of pyrolysis oil after preliminary treatment, primarily after distillation, as well as as a component of blended fuels. It is concluded that the pyrolysis of polyethylene waste is a promising direction of chemical recycling, combining the solution of environmental problems associated with reducing plastic waste volumes with the possibility of obtaining valuable liquid hydrocarbon products for further fuel and chemical use.

Keywords: polyethylene, plastic waste, pyrolysis, pyrolysis oil, liquid fuel, chemical recycling, distillation, diesel, gasoline.

Введение. Проблема накопления пластиковых отходов сохраняет глобальный характер. По данным современного глобального анализа жизненного цикла пластмасс, в 2022 году мировое производство пластика составило около 400 млн тонн, при этом лишь около 9.5% этого объёма было произведено из вторичного сырья. Основная часть первичных пластмасс по-прежнему производится из ископаемых ресурсов, прежде всего угля, нефти и природного газа. Производство пластмасс демонстрирует устойчивый рост: если в 1950 году оно составляло около 2 млн тонн в год, то к 2022 году достигло 400 млн тонн, а к 2050 году, по прогнозам, может удвоиться. Одновременно уровень фактической пе-

реработки пластиковых отходов остаётся низким: по оценкам, в 2022 году глобальный уровень переработки составил около 9%, тогда как значительная часть отходов была направлена на сжигание или захоронение. В этих условиях особую актуальность приобретают технологии, способные не только снижать объёмы накопления пластиковых отходов, но и возвращать ценные углеводородные компоненты в промышленный оборот. [1].

Несмотря на развитие систем сбора и сортировки отходов, уровень фактической переработки пластмасс остаётся низким. По современным оценкам, в 2022 году из общего объёма пластиковых отходов лишь около 38 млн тонн были реально переработаны, что соответствует примерно 9% от объёма первичного на сжигание или захоронение, что сопровождается потерей ценного углеродсодержащего сырья и усилением негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим всё большую актуальность приобретают технологии, ориентированные не только на утилизацию пластиковых отходов, но и на их преобразование в полезные продукты [2].

Одним из наиболее перспективных направлений химической переработки пластиковых отходов считается пиролиз. Современные обзорные исследования рассматривают его как технологию, способную превращать пластиковые отходы в ценные продукты, включая жидкие углеводороды, химическое сырьё и топливные компоненты. По литературным данным, пиролиз пластиковых отходов может обеспечивать высокий выход жидкой фракции, а для полиэтиленсодержащего сырья этот подход особенно интересен вследствие значительного содержания углеводородных соединений, пригодных для дальнейшего энергетического или химического использования [3-4].

Особый интерес представляет переработка отходов полиэтилена, поскольку данный полимер является одним из наиболее распространённых компонентов пластиковых отходов и при термическом разложении способен образовывать значительное количество жидких продуктов. Получаемое пиролизное масло рассматривается как потенциальный компонент жидкого топлива, однако возможность его практического применения определяется не только выходом продукта, но и его физико-химическими свойствами, стабильностью состава, фракционным распределением и соответствием требованиям к традиционным топливам. Поэтому исследование свойств пиролизного масла из отходов полиэтилена и оценка перспектив его использования в качестве топливного компонента представляют как научный, так и прикладной интерес [5].

Несмотря на значительное количество публикаций по пиролизу пластиковых отходов, литературные данные по переработке полиэтилена остаются неоднородными. В отдельных исследованиях различаются состав сырья, температурные режимы, давление, конструкции реакторов, применяемые катализаторы и способы подготовки жидкого продукта. Это затрудняет прямое сопоставление полученных результатов и однозначную оценку перспектив использования пиролизного масла в топливных целях. Научная ценность настоящего обзора заключается в систематизации данных о взаимосвязи между условиями пиролиза полиэтиленовых отходов, свойствами получаемого масла, необходимостью его последующей подготовки и возможными направлениями практического применения.

Цель исследования - оценить возможность использования пиролизного масла, полученного из отходов полиэтилена, в качестве компонента жидкого топлива на основе анализа литературных данных о выходе продукта, его физико-химических свойствах и ограничениях практического применения [6].

Задачи исследования:

1. Рассмотреть пиролиз отходов полиэтилена как способ получения жидких углеводородных продуктов.
2. Проанализировать влияние технологических параметров на выход жидкой фракции.
3. Изучить основные физико-химические свойства пиролизного масла из полиэтилена.
4. Сопоставить характеристики получаемого продукта с показателями традиционных жидких топлив.
5. Оценить перспективы и ограничения использования пиролизного масла в качестве компонента топливных композиций.
6. Рассмотреть влияние типа реактора, давления и природы катализатора на распределение продуктов пиролиза.
7. Проанализировать экологические, экономические и технологические ограничения промышленного внедрения процесса.
8. Сопоставить пиролиз с альтернативными методами обращения с пластиковыми отходами.

Материалы и методы. Настоящая работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование с элементами структурированного литературного

поиска. Для подготовки обзора использовались научные статьи, обзорные публикации, официальные аналитические отчёты и открытые материалы, посвящённые пиролизу пластиковых отходов с преимущественным акцентом на переработку полиэтилена низкой, высокой и линейной низкой плотности.

Поиск научной литературы проводился с использованием электронных научных платформ и репозиториев RSC Publishing, MDPI, ScienceDirect, PubMed Central (PMC), Digital.CSIC, UCL Discovery, OSUVA, JRC Publications Repository и Nottingham ePrints. Основу обзора составили публикации за период 2018–2026 гг., при этом приоритет отдавался современным исследованиям 2020–2026 гг. Дополнительно для анализа реальных примеров промышленного внедрения использовались официальные материалы компаний Plastic Energy, OMV и Neste.

Поиск выполнялся с использованием сочетаний ключевых слов на английском языке: polyethylene waste pyrolysis, HDPE pyrolysis, LDPE pyrolysis, LLDPE pyrolysis, plastic pyrolysis oil, fuel component, temperature, pressure, catalyst, reactor type, distillation, hydrotreatment, diesel blend, life cycle assessment, techno-economic assessment, industrial plastic pyrolysis и chemical recycling. Дополнительно рассматривались публикации по пиролизу смешанных пластиковых отходов в тех случаях, когда их результаты позволяли оценить общие закономерности процесса или сопоставить поведение различных полимеров.

В обзор включались источники, содержащие сведения об условиях проведения пиролиза, составе исходного сырья, температуре, давлении, скорости нагрева, времени пребывания продуктов в реакционной зоне, конструкции реактора, наличии и типе катализатора, распределении жидких, газообразных и твёрдых продуктов, а также физико-химических свойствах получаемого пиролизного масла. Отдельно анализировались способы подготовки жидкого продукта к практическому применению, включая дистилляцию, гидрообработку и смешение с традиционными нефтяными топливами.

При отборе экологических и экономических материалов учитывались исследования, содержащие оценку жизненного цикла, сведения об энергопотреблении процесса, затратах на подготовку сырья, масштабировании установок и интеграции пиролиза с нефтеперерабатывающей или нефтехимической инфраструктурой. Материалы корпоративных сайтов использовались только для описания конкретных действующих или демонстрационных промышленных объектов и не рассматривались как единственная доказательная база при оценке эффективности технологии.

Систематизация литературных данных проводилась по следующим направлениям: влияние температуры, давления и катализаторов на выход и состав продуктов; сопоставление различных типов реакторов; сравнительный анализ физико-химических свойств пиролизного масла и традиционных топлив; способы облагораживания жидкого продукта; экологические и экономические аспекты; ограничения технологии; реальные примеры промышленного внедрения. При сравнении результатов учитывались различия в составе сырья и экспериментальных условиях, поскольку данные отдельных исследований не всегда могут быть непосредственно сопоставлены между собой.

Обсуждение и результаты. Пиролиз отходов полиэтилена как способ получения жидкого топливного продукта. Обобщённая принципиальная схема получения пиролизного масла из отходов полиэтилена представлена на рисунке 1.

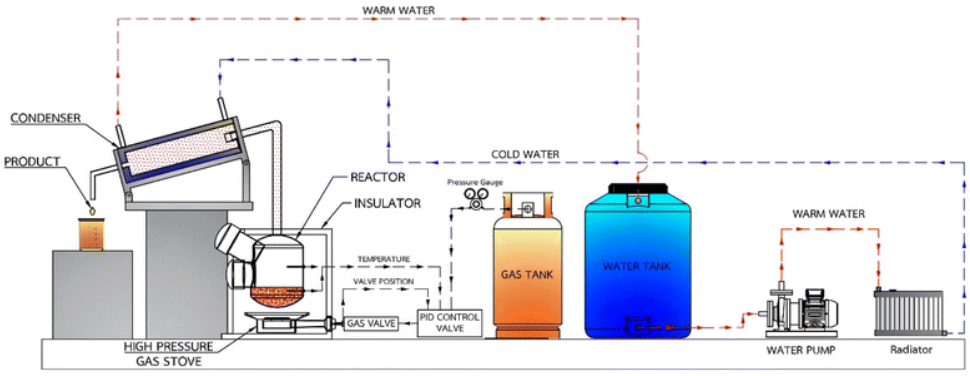


Рис. 1 - Принципиальная схема производства пиролизного масла из отходов полиэтилена

Согласно рисунку 1, схема отражает основные стадии процесса, включающие термическое разло-

жение полимерного сырья в реакторе, транспортировку парогазовой смеси, её охлаждение в конденсационной системе и получение жидкого продукта. Использование данной схемы позволяет обобщить технологическую последовательность получения пиролизного масла и служит основой для дальнейшего анализа его свойств и направлений применения [7].

Сравнительная оценка проводилась по наиболее значимым показателям, определяющим возможность топливного применения продукта: выход жидкой фракции, плотность, кинематическая вязкость, теплотворная способность, температура вспышки и характер углеводородного состава. Дополнительно учитывались данные о необходимости последующей доочистки, дистилляции или гидрообработки пиролизного масла перед его использованием в двигателях или топливных смесях [8].

Пиролиз представляет собой термическое разложение органического сырья в отсутствие кислорода. В обзоре 2025 года для пластиковых отходов указывается, что процесс обычно протекает в диапазоне примерно 455-700°C, а на распределение продуктов существенно влияют температура, время пребывания, скорость нагрева, состав сырья и наличие катализатора. Для полиэтилена это направление особенно интересно, поскольку полимерная цепь состоит преимущественно из углеводородных фрагментов, способных при термическом разложении переходить в жидкие топливоподобные продукты [3, 9].

Термическое разложение полиэтилена протекает по радикальному механизму. На начальной стадии происходит разрыв связей C-C в макромолекулярной цепи с образованием более коротких углеводородных фрагментов и свободных радикалов.

Последующие реакции включают дальнейшее расщепление цепей, внутримолекулярные и межмолекулярные превращения, а также образование более стабильных жидких и газообразных углеводородов. При повышении температуры интенсивность вторичных реакций возрастает, вследствие чего часть жидких продуктов дополнительно разлагается с увеличением выхода газообразной фракции [10].

Как видно из рисунка 2, скорость нагрева оказывает влияние на температурные интервалы и характер разложения полимерного сырья, что необходимо учитывать при выборе режима пиролиза.

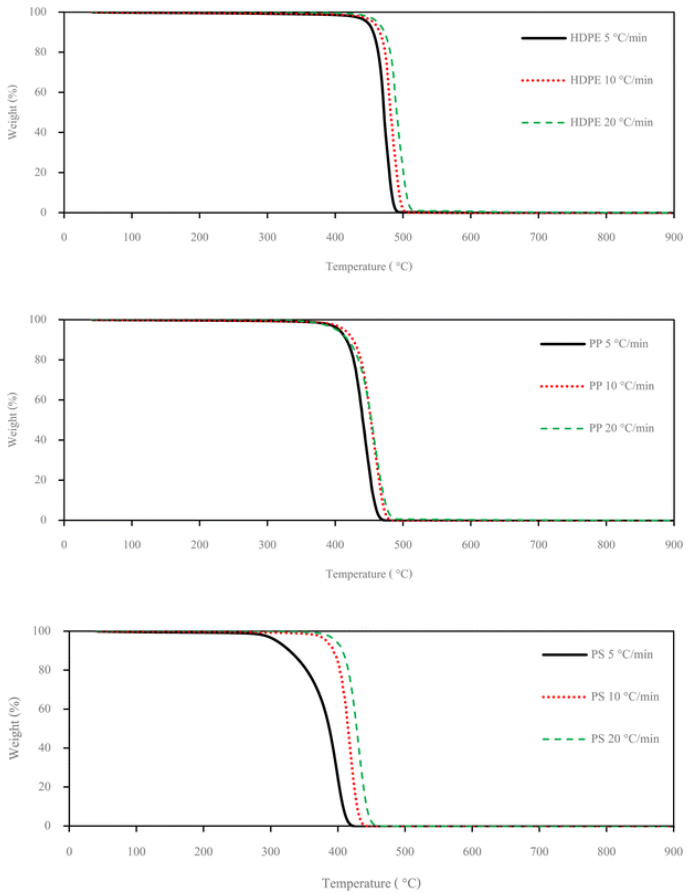


Рис. 2 - Кривые разложения пластикового сырья при разных скоростях нагрева

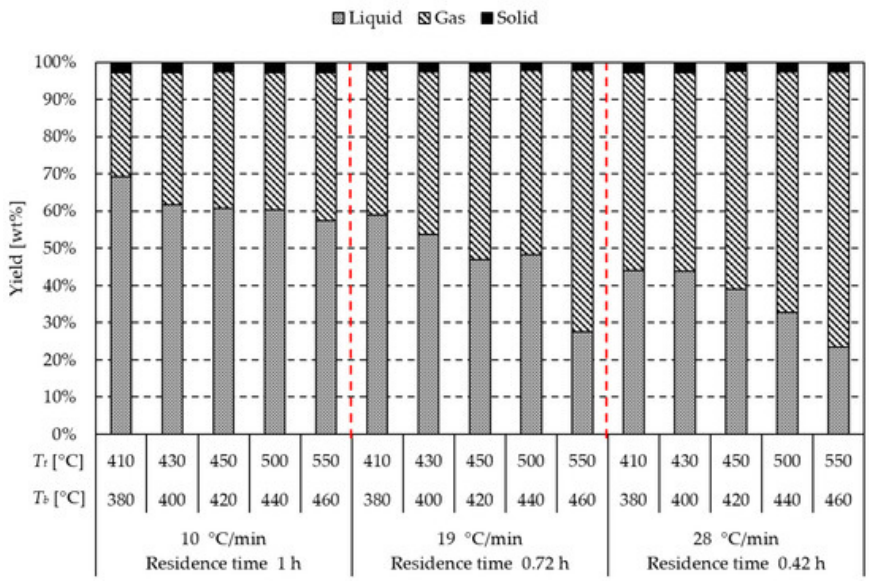


Рис. 3 – Влияние температуры и скорости нагрева на выход продуктов пиролиза

Из рисунка 3, более низкая температура и меньшая скорость нагрева, соответствующая большему времени пребывания, способствуют увеличению выхода жидкого продукта, тогда как ужесточение режима приводит к росту газообразной фракции. Следовательно, получение пиролизного масла определяется не только природой полимерного сырья, но и выбранными технологическими условиями процесса.

По литературным данным, именно полиэтилен часто обеспечивает высокий выход жидкой фракции. Например, в исследовании пяти распространённых типов пластиков максимальный выход жидкого продукта для HDPE достигал 82%, тогда как для LDPE он составил около 58%. При этом теплотворная способность полученных продуктов находилась на уровне 45.9-46.2 МДж/кг, что близко к значениям традиционного дизельного топлива и бензина [8].

В то же время выход масла зависит не только от типа полимера, но и от режима процесса. На примере смеси пластиков показано, что повышение температуры или уменьшение времени пребывания паров снижает выход жидкого продукта и увеличивает выход газов. В указанной работе максимальный выход масла составил 69% при 410°C и скорости нагрева 10°C/мин, что подтверждает важность оптимизации режима пиролиза [11].

Для объяснения зависимости распределения продуктов от температурного режима необходимо учитывать механизм термического разложения полиэтилена. На рисунке 4 представлена схема последовательных превращений полиэтиленовой цепи при пиролизе [10].

Как видно из рисунка 4, первичной стадией процесса является разрыв связей C-C в макромолекулярной цепи с образованием более коротких углеводородных фрагментов и свободных радикалов. Последующие превращения приводят к формированию жидких углеводородов, воскообразных продуктов и газообразных соединений. При ужесточении температурного режима усиливается вторичный крекинг уже образовавшихся жидких компонентов, что сопровождается увеличением выхода газа [10].

Влияние катализаторов, давления и температурных условий на процесс пиролиза полиэтиленовых отходов. Выход и состав продуктов пиролиза полиэтиленовых отходов в значительной степени определяются условиями проведения процесса. По данным современного обзора, для пластиковых отходов в целом пиролиз обычно протекает в диапазоне 455-700°C, а на распределение жидких, газообразных и твёрдых продуктов наиболее существенно влияют температура, время, состав сырья, тип реактора и выбор катализатора. Оптимизация этих параметров рассматривается как один из ключевых путей повышения выхода жидкой фракции и улучшения качества получаемого пиролизного масла [9].

В зависимости от наличия катализатора пиролиз пластиковых отходов подразделяется на термический и каталитический. Принципиальные различия между двумя вариантами процесса представлены на рисунке 5 [12].

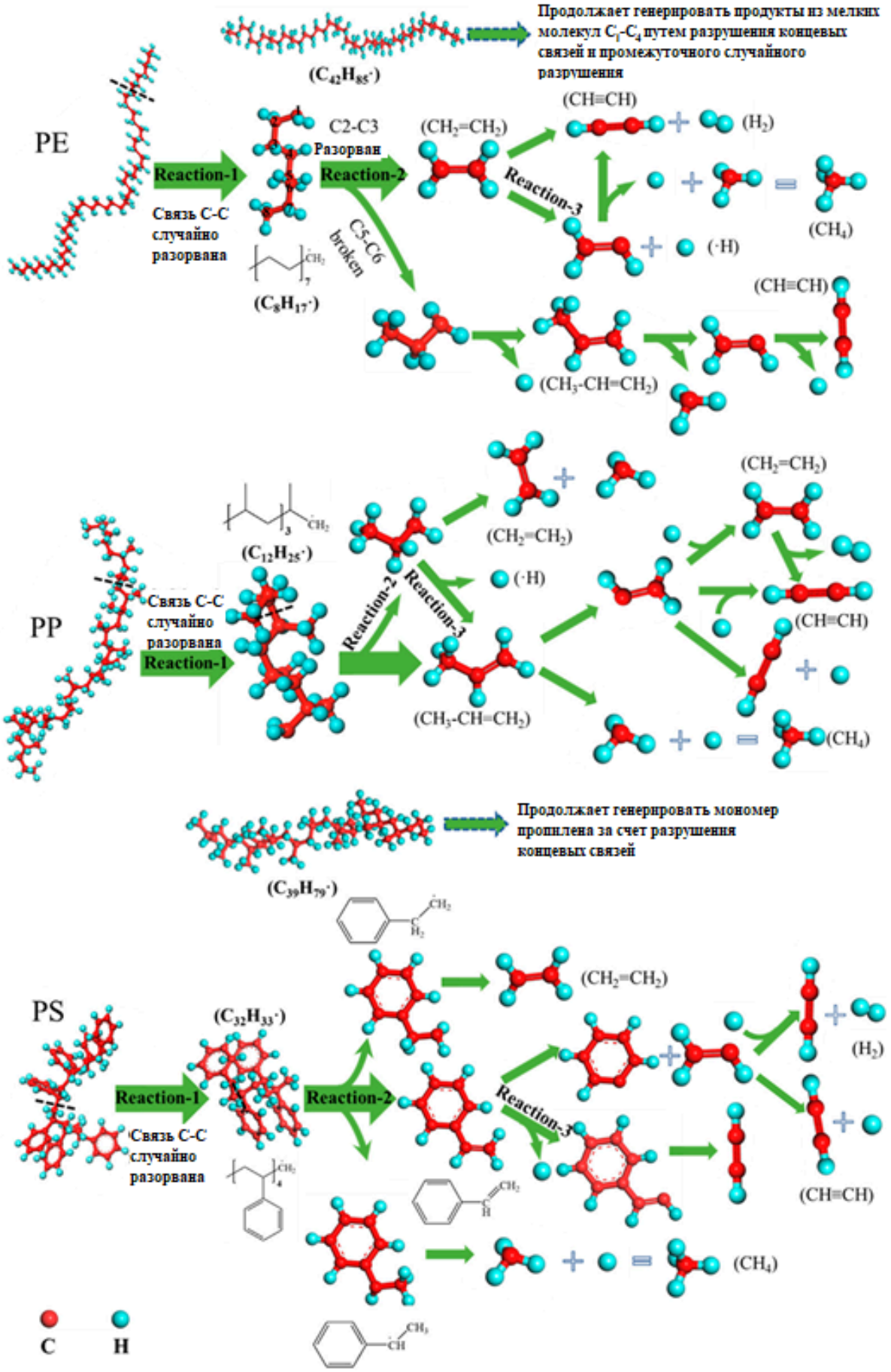


Рис. 4 - Схема термического разложения полиэтилена



Рис. 5 - Схематическое представление термического и каталитического путей пиролиза пластиковых отходов

Как видно из рисунка 5, термический пиролиз основан на разложении полимерного сырья под действием температуры без применения каталитического материала. При каталитическом варианте направление вторичных превращений дополнительно определяется свойствами катализатора, что позволяет изменять распределение продуктов и углеводородный состав жидкой фракции. Одновременно использование катализатора создаёт дополнительные требования к подбору режима, предотвращению коксообразования и регенерации каталитического материала [12, 13].

Температура является одним из наиболее значимых факторов. При повышении температуры интенсифицируется разрыв полимерных цепей, однако слишком жёсткие температурные условия усиливают вторичный крекинг жидких продуктов и увеличивают долю газа. В открытом исследовании по пиролизу пластмасс в фиксированном слое показано, что для HDPE максимальный выход жидких углеводородов наблюдался при 773 K (около 500°C) и составлял 62.2 мас. %, тогда как при 973 K доля жидкого продукта снижалась, а выход газа возрастал до 68.6 мас.%. Аналогичная тенденция отмечена и для других пластиков: рост температуры выше оптимального диапазона уменьшает выход конденсируемой фракции за счёт вторичных реакций [14].

Существенную роль играет и природа катализатора. В обзорах по пиролизу пластиков подчёркивается, что каталитический пиролиз позволяет не только изменять распределение продуктов, но и нередко снижать требуемую температуру процесса по сравнению с чисто термическим разложением. В частности, было показано, что использование таких катализаторов, как активированный оксид алюминия, ZSM-5, катализатор FCC и галлуазитовая глина, позволило снизить температуру пиролиза polyolefins с 470 до 450°C при улучшении выхода жидкого продукта [15].

Для полиэтилена влияние катализатора проявляется также в изменении селективности по углеводородному составу. В исследовании 2024 года по LLDPE при 600°C показано, что оксидные катализаторы улучшают качество жидкой фракции: Al_2O_3 способствует формированию лёгких и средних углеводородов диапазона C_7-C_{20}, тогда как MgO и CaO усиливают образование более лёгких соединений диапазона C_7-C_{12}. Одновременно авторы отмечают, что повышение температуры и использование катализаторов могут увеличивать выход газа и твёрдого остатка, что требует подбора оптимального режима в зависимости от целевого продукта [16].

Давление в литературе освещено менее подробно, чем температура и катализ, однако его влияние на состав продуктов также подтверждается экспериментально. В исследовании по HDPE показано, что при 464°C и субатмосферическом давлении 0.1 бар получали масло с максимальной долей линейных углеводородов 93.2 мас. %, тогда как при более высоких давлении и температуре возрастала доля циклических и разветвлённых соединений до 17.4 мас. % против 6.8 мас. % при вакуумных условиях и более мягком режиме [14].

Интересны и данные о высоком начальном давлении инертного газа. В работе 2023 года по пиролизу полиэтилена установлено, что увеличение начального давления азота с 2 до 21 бар сопровождалось ростом пиковой температуры системы с 428.1 до 476.7°C, что авторы связывают с фазовыми переходами, вызванными давлением в полиэтилене. Авторы показывают, что давление способно существенно влиять на течение процесса и способствовать полу-

чению высококачественных топливных продуктов даже при более низкой заданной температуре [17].

Анализ литературных данных показывает, что температура, тип катализатора и давление являются взаимосвязанными параметрами, определяющими как выход жидкой фракции, так и её состав. С практической точки зрения наиболее перспективным представляется подбор таких условий пиролиза, при которых обеспечивается высокий выход жидкого продукта при ограничении вторичного крекинга и формировании углеводородного состава, близкого к требованиям топливного применения [9].

Для систематизации рассмотренных литературных данных в таблице 1 представлены условия проведения пиролиза полиэтиленовых отходов и их влияние на выход и состав получаемых продуктов. При сопоставлении результатов учитывались вид сырья, температура и давление процесса, наличие катализатора, конструкция реактора и продолжительность реакции.

Таблица 1 - Систематизация литературных данных о влиянии условий пиролиза на выход и состав продуктов

Сырье	T, °C	P, бар	Катализатор	Тип реактора	Выход жидкой фракции	Основной эффект
HDPE	Около 500°C	Не указано; инертная среда N_2	Без катализатора	Неподвижный слой	62.2 мас. %	При дальнейшем повышении температуры до 700°C возрастает доля газообразных продуктов; максимальный выход газа достигает 68.6 мас. % [14].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	Без катализатора	Периодический реактор	44.31 мас. %	Термический пиролиз использован как базовый вариант для сопоставления с каталитическими режимами [16].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	Al_2O_3, соотношение PE : катализатор = 10 : 1	Периодический реактор	31.68 ± 1.14 мас. %	Формируется более широкий диапазон лёгких и средних углеводородов C_7-C_{20}, потенциально пригодных для бензиновых и дизельных фракций [16].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	MgO, соотношение PE : катализатор = 10 : 1	Периодический реактор	29.64 ± 1.95 мас. %	Усиливается образование преимущественно лёгких углеводородов C_7-C_{12} отмечается более выраженное коксообразование по сравнению с CaO [16].
LLDPE	600°C	Не указано; инертная среда N_2	CaO, соотношение PE : катализатор = 10 : 1	Периодический реактор	35.08 ± 1.01 мас. %	Усиливается образование преимущественно лёгких углеводородов C_7-C_{12} катализатор демонстрирует более высокую устойчивость к коксообразованию по сравнению с MgO [16].
HDPE	464°C	0.1 бар	Без катализатора	Непрерывная пилотная установка	н/д	В составе пиролизного масла достигнута максимальная доля линейных углеводородов 93.2 мас. %. При повышении температуры и давления возрастает доля циклических и разветвлённых соединений [14].
LDPE	380°C	2-21 бар, N_2	Без катализатора	Автоклав периодического действия объёмом 100 мл с магнитной мешалкой	До ~90 мас. %	Повышение начального давления азота с 2 до 21 бар увеличивает пиковую температуру системы с 428.1 до 476.7°C и способствует более глубокому расщеплению полимерных цепей [17].

Сырье	T, °C	P, бар	Катализатор	Тип реактора	Выход жидкой фракции	Основной эффект
LDPE + 1-гексен	340°C	Начальное атмосферное давление; среда N_2	1-гексен как инициатор фазового перехода	Автоклав периодического действия объёмом 100 мл с магнитной мешалкой	Около 90 мас. %	Добавление 1-гексена позволяет получить высокий выход топливного масла при более низкой заданной температуре и без применения высокого начального давления [17].

Примечание - н/д означает, что данные не приведены в рассматриваемом источнике.

Как видно из таблицы 1, выход и состав продуктов пиролиза полиэтилена определяются не одним параметром, а совокупностью технологических условий. Для HDPE при термическом пиролизе в реакторе с неподвижным слоем максимальный выход жидкой фракции составил 62.2 мас. % при температуре около 500°C, тогда как дальнейшее повышение температуры сопровождалось увеличением доли газообразных продуктов. При каталитическом пиролизе LLDPE применение Al_2O_3, MgO и CaO не обеспечивало максимального выхода жидкой фракции по сравнению с некаталитическим режимом, однако позволяло изменять её углеводородный состав. В частности, Al_2O_3 способствовал образованию более широкого диапазона соединений C_7-C_{20}, тогда как MgO и CaO смещали состав продукта в сторону более лёгких углеводородов C_7-C_{12}.

Данные по влиянию давления также показывают, что изменение режима может отражаться не только на количестве масла, но и на его качественном составе. При субатмосферическом давлении для первичного HDPE была получена высокая доля линейных углеводородов, а увеличение начального давления азота при пиролизе LDPE сопровождалось повышением пиковой температуры системы и более глубоким расщеплением полимерных цепей. Следовательно, выбор условий процесса должен определяться целевым направлением применения продукта: максимизацией выхода жидкой фракции либо получением углеводородов требуемого диапазона для дальнейшей топливной или нефтехимической переработки.

Влияние типа реактора на выход и свойства продуктов пиролиза. Конструкция реактора является одним из факторов, определяющих эффективность пиролиза пластиковых отходов. Тип реактора влияет на интенсивность тепло- и массообмена, равномерность нагрева сырья, контакт полимера с катализатором, время пребывания паров в реакционной зоне и вероятность протекания вторичных реакций. По этой причине результаты пиролиза полиэтилена, полученные в разных исследованиях, не всегда могут быть непосредственно сопоставлены только на основании температуры процесса или типа катализатора [12].

Реакторы с неподвижным слоем характеризуются сравнительно простым устройством и широко применяются в лабораторных исследованиях. Передача тепла в таких аппаратах осуществляется преимущественно от стенок реактора к сырью, а при каталитическом варианте процесса частицы катализатора находятся в стационарном слое. Эти реакторы могут использоваться и как вторичная стадия для дополнительного преобразования парогазовых продуктов первичного пиролиза. Вместе с тем ограниченная интенсивность перемешивания и возможность возникновения температурных градиентов снижают эффективность теплообмена, особенно при масштабировании процесса [12].

Реакторы с псевдоожиженным слоем обеспечивают более интенсивный тепло- и массообмен благодаря движению частиц под действием восходящего потока газа. Их преимуществами являются более равномерное распределение температуры, эффективный контакт сырья с катализатором и возможность организации непрерывного процесса. Такие аппараты особенно перспективны для быстрого пиролиза и переработки значительных объёмов сырья, но их эксплуатация требует более точного контроля размера частиц, скорости газового потока и условий подачи расплавленного полимера. Дополнительной проблемой может стать нарушение устойчивости слоя при переработке вязкого или склонного к слипанию сырья [12].

При вакуумном пиролизе процесс проводится при пониженном давлении. Это уменьшает продолжительность пребывания паров в реакционной зоне и ограничивает вторичный крекинг уже образовавшихся жидких продуктов. В результате снижается вероятность их дополнительного разложения до неконденсируемых газов. Вакуумные реакторы могут быть полезны в тех случаях, когда основной

целью является сохранение жидкой фракции, однако создание и поддержание пониженного давления усложняет аппаратурное оформление процесса [12].

Конические реакторы с фонтанирующим слоем отличаются высокой интенсивностью перемешивания и эффективной передачей тепла между фазами. Они способны работать с частицами различного размера и плотности, а также демонстрируют меньшую склонность к нарушению гидродинамического режима при переработке липких материалов. Это особенно важно для полиэтилена, который размягчается и плавится при нагревании. Вместе с тем промышленное применение таких аппаратов ограничивается сложностями подачи катализатора, уноса твёрдых частиц и последующего разделения продуктов [12].

Универсального типа реактора, одинаково эффективного для всех вариантов пиролиза полиэтиленовых отходов, не существует. Выбор оборудования должен определяться целевым продуктом и условиями процесса. Реакторы с неподвижным слоем удобны для лабораторных исследований и вторичных каталитических стадий, реакторы с псевдоожиженным слоем для непрерывной переработки и повышения эффективности теплообмена, вакуумные реакторы для ограничения вторичных реакций и сохранения жидкого продукта, конические реакторы с фонтанирующим слоем для улучшения перемешивания и переработки склонного к слипанию сырья. При сравнении литературных данных необходимо учитывать не только температуру, давление и катализатор, но и конструкцию реактора [12].

Сравнительная характеристика основных типов реакторов, применяемых для пиролиза пластиковых отходов, представлена в таблице 2. При сопоставлении учитывались особенности тепло- и массообмена, возможность организации непрерывного процесса, технологические ограничения и наиболее целесообразные направления применения каждого типа оборудования.

Таблица 2 - Сравнительная характеристика реакторов для пиролиза пластиковых отходов

Тип реактора	Основные преимущества	Основные ограничения	Наиболее целесообразное применение
Реактор с неподвижным слоем	Простота конструкции; удобство лабораторных исследований; возможность использования катализатора в стационарном слое	Ограниченная интен-сивность перемеши-вания; возможные температурные градиенты; сложности масштабирования	Лабораторные исследования; вторичная каталитическая переработка парогазовых продуктов
Реактор с псевдоожиженным слоем	Интенсивный тепло- и массообмен; равномерный нагрев; хороший контакт сырья с катализатором; возможность непрерывной работы	Необходимость контроля размера частиц и скорости газа; возможное нарушение устойчивости слоя при переработке липкого сырья	Быстрый пиролиз; непрерывная пере-работка значительных объёмов пластиковых отходов
Вакуумный реактор	Сокращение времени пребывания паров; ограничение вторичного крекинга; возможность повышения сохранности жидкой фракции	Усложнение аппаратурного оформления; необходимость поддержания пониженного давления	Получение жидкого продукта с ограни-чением вторичных реакций
Конический реактор с фонтанирующим слоем	Эффективное перемешивание; высокий теплообмен; работа с частицами различного размера и плотности; меньшая склонность к нарушению режима при переработке липкого сырья	Сложности подачи катализатора; унос твёрдых частиц; необходимость эффективного разделения продуктов	Непрерывная переработка полимерного сырья, склонного к размягчению и слипанию

Как видно из таблицы 2, выбор реактора оказывает существенное влияние на условия проведения пиролиза и распределение получаемых продуктов. Реакторы с неподвижным слоем отличаются сравни-

тельно простой конструкцией и удобны для лабораторных исследований, однако их масштабирование может быть ограничено недостаточно интенсивным тепло- и массообменом. Реакторы с псевдоожиженным слоем обеспечивают более равномерный нагрев и эффективный контакт сырья с катализатором, что делает их перспективными для непрерывной переработки значительных объёмов пластиковых отходов. Вакуумные реакторы позволяют уменьшить продолжительность пребывания паров в реакционной зоне и ограничить вторичный крекинг жидких продуктов, но требуют более сложного аппаратурного оформления. Конические реакторы с фонтанирующим слоем обеспечивают интенсивное перемешивание и могут быть эффективны при переработке склонного к размягчению и слипанию полимерного сырья.

Физико-химические свойства пиролизного масла из полиэтилена. Одним из ключевых аргументов в пользу практического использования пиролизного масла является его высокая теплотворная способность. В обзорных и экспериментальных исследованиях для пластиковых пиролизных масел обычно приводятся значения свыше 40 МДж/кг, а для продуктов, полученных из полиэтилена, теплотворная способность часто оказывается близкой к уровню дизельного топлива. Так, для HDPE и LDPE в одном из исследований были получены значения 45.9 и 46.2 МДж/кг, а в работе по каталитическому пиролизу HDPE сообщается о теплотворной способности масла 49.3 МДж/кг [8], [9].

Важными показателями также являются плотность и вязкость, поскольку именно они во многом определяют поведение топлива при хранении, перекачке и сгорании. Однако литературные данные показывают, что свойства пиролизного масла могут заметно варьировать в зависимости от сырья и условий процесса. В обзорной таблице для HDPE-пиролизного масла приводятся типичные значения плотности около 0.90 г/см^3 и вязкости около 5.06 мм^2/с, тогда как в более селективном каталитическом процессе получено масло с плотностью 823.8 кг/м^3 и вязкостью 1.8 мм^2/с, то есть уже ближе к дизельным показателям. Это означает, что говорить о «едином» качестве пиролизного масла нельзя, то есть его свойства определяются конкретной технологией получения [9].

Существенной особенностью пиролизного масла является широкий углеводородный и фракционный состав. В исследовании термического пиролиза смеси пластиков было показано, что получаемое масло охватывает широкий диапазон углеводородов и требует последующего фракционирования перед использованием в двигателях внутреннего сгорания. После разделения были выделены фракции бензинового, дизельного и тяжёлого дизельного диапазона в количествах 21.12%, 56.52% и 22.36% соответственно. Это особенно важно для нашей темы, поскольку подтверждает: пиролизное масло рациональнее рассматривать не как полностью готовое моторное топливо, а как сырьё для дальнейшей подготовки или как компонент смесевых топлив [11].

По данным обзора по применению пиролизного масла в дизельных двигателях, такие масла часто характеризуются более высокой вязкостью и плотностью, пониженной температурой вспышки и пониженным цетановым индексом по сравнению с коммерческим дизельным топливом. Поэтому наиболее реалистичным направлением их применения считается использование после дистилляции, гидрообработки или в виде смесей с традиционными нефтяными топливами [6].

Перспективы и ограничения использования пиролизного масла в качестве компонента жидкого топлива. Анализ литературных данных показывает, что пиролизное масло из полиэтиленовых отходов действительно обладает значительным энергетическим потенциалом. Его высокая теплотворная способность, наличие углеводородов бензинового и дизельного диапазона, а также возможность получения высоких выходов жидкой фракции делают его перспективным промежуточным продуктом для топливного использования. Особенно показательно, что в ряде исследований свойства масел из HDPE оказываются близки к дизельному топливу, а при каталитической переработке могут практически соответствовать его базовым физическим параметрам [8, 18].

Для наглядного сопоставления основных эксплуатационно значимых характеристик в таблице 3 приведено сравнение свойств пиролизного масла из отходов полиэтилена и дизельного топлива.

Таблица 3 раскрывает что, пиролизное масло по ряду показателей приближается к дизельному топливу, прежде всего по теплотворной способности, однако различия по вязкости, температуре вспышки, фракционному составу и стабильности ограничивают возможность его прямого использования без предварительной подготовки.

Одновременно прямое использование такого продукта без дополнительной подготовки остаётся

ограниченным. Основными причинами являются нестабильность состава, наличие непредельных соединений, широкий фракционный диапазон и изменчивость свойств в зависимости от режима получения. По этой причине наиболее обоснованным выглядит применение пиролизного масла из полиэтилена либо после дополнительной переработки, либо в составе смесевых топлив, либо как сырья для последующей нефтехимической и топливной доработки [6], [11].

Таблица 3 - Топливные свойства пиролизного масла, полученного из пластиков, и их сопоставление со стандартными значениями для бензина и дизельного топлива

Свойства	**ЕИ**	**Типы пластмасс (типичное экспериментальное значение)**						**Коммерческое стандартное значение (ASTM 1979)**	
		PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	Бензин	Дизель
Теплотворная способность	МДж/кг$^{-1}$	28.2	40.5	21.1	39.5	40.8	43	42.5	43
Плотность по API при 60°F	-	-	27.48	38.98	48.05	33.03	-	55	38
Вязкость	мм^2/с$^{-1}$	-	5.06	7.05	5.56	5.02	1.8	1.18	1.9-4.1
Плотность при 15°C	г/см$^{-3}$	0.9	0.9	0.79	0.79	0.85	0.8	0.658	0.907
Зольность	масс%	-	0	-	0.035	0	0.007	-	0.02
Октановое число по ММ (мин.)		-	86	-	-	88	-	82-86	-
Октановое число по ИМ (мин.)		-	96	-	-	98	90-98	90-94	-
Температура застывания	°C	-	−4	-	-	−10	−68	-	7
Точка воспламенения	°C	-	49	39	40	29	27	43	51
Анилиновая точка	°C	-	56	-	-	39	-	69	78
Дизельный индекс		-	30	-	-	35	-	-	38

Подготовка пиролизного масла к использованию в составе жидких топлив. Пиролизное масло, полученное из отходов полиэтилена, не следует рассматривать как полностью готовое моторное топливо без дополнительной подготовки. Его свойства зависят от состава исходного сырья, режима пиролиза и условий конденсации, а в ряде работ подчёркивается, что сырое пиролизное масло из пластиковых отходов обычно характеризуется более высокой вязкостью и плотностью, пониженной температурой вспышки и нестабильным составом по сравнению со стандартным дизельным топливом. В обзорной работе 2023 года прямо отмечено, что повышение пригодности пиролизного масла к практическому применению достигается за счёт последующей обработки, прежде всего дистилляции и гидрообработки [6].

Первым и наиболее очевидным этапом подготовки является фракционирование. По данным Energy & Fuels, пиролизные жидкости из пластиков в значительной степени состоят из углеводородов дизельного диапазона кипения 180-380°C, причём их доля может составлять примерно 50-55 об.%. Это означает, что дистилляция позволяет выделить более узкую и технологически удобную фракцию, приблизив свойства продукта к требованиям, предъявляемым к дизельным и котельным топливам. Исследование 2023 года, в котором сравнивалось сырое, дистилли-

рованное и гидроочищенное пластиковое дизельное топливо, также показывает, что дистилляция является необходимым промежуточным этапом перед дальнейшим повышением качества продукта [19, 20].

Следующим важным направлением является гидрообработка. Показано, что гидрообработка пиролизного масла, полученного из полиэтилена, снижает его реакционную способность и способствует образованию более стабильных дизельных и керосиновых фракций. В прикладных исследованиях также установлено, что последовательное сочетание вакуумной дистилляции и гидрообработки позволяет значительно приблизить свойства продукта к стандартному автомобильному дизельному топливу [21].

Наиболее реалистичным способом внедрения пиролизного масла на современном этапе является его применение в составе смесевых топлив. В экспериментальной работе 2024 года, в которой исследовалось пиролизное масло, полученное из пакетов из HDPE для продуктов из полиэтилена высокой плотности, показано, что низкие добавки PPO к дизельному топливу вплоть до 15% могут использоваться в дизельном двигателе без модификации конструкции, при этом основные показатели работы и часть экологических характеристик остаются сопоставимыми с базовым дизельным топливом. Это подтверждает, что смесь дизеля с умеренной долей подготовленного пиролизного масла является более реалистичным направлением внедрения, чем использование неочищенного продукта в чистом виде [22].

Обобщённая последовательность подготовки пиролизного масла к дальнейшему применению представлена на рисунке 6.



Рис. 6 - Основные стадии получения, подготовки и практического использования пиролизного масла из полиэтиленовых отходов

Как видно из рисунка 6, жидкий продукт пиролиза целесообразно рассматривать в качестве промежуточного углеводородного сырья. Перед использованием его свойства можно скорректировать путем дистилляции и, при необходимости, гидроочистки. После приготовления продукт может быть использован в составе смеси жидких топлив или направлен на дальнейшую нефтехимическую переработку. Дополнительным преимуществом процесса является возможность использования части неконденсирующихся газов для удовлетворения тепловых потребностей установки.

Наиболее перспективные направления применения пиролизного масла из отходов полиэтилена. С учётом рассмотренных свойств пиролизного масла и необходимости его предварительной подготовки наиболее перспективным направлением его использования следует считать не прямое применение в качестве готового моторного топлива, а использование как промежуточного углеводородного продукта. Современные исследования показывают, что пиролизное масло может рассматриваться либо как компонент жидких топлив после облагораживания, либо как химическое сырьё для дальнейшей перера-

ботки. В открытом исследовании, опубликованном в Polymers, пиролизные масла специально сопоставлялись с лёгкой и тяжёлой нафтою с точки зрения возможности их использования как сырья для получения полиолефинов, то есть акцент делался именно на сырьё, а не только на энергетическом использовании [23].

Одним из наиболее реалистичных путей практического внедрения остаётся использование пиролизного масла в составе смесевых жидких топлив. Такой подход позволяет частично заместить нефтяное топливо без необходимости полного соответствия всех свойств пиролизного продукта требованиям к товарному дизелю. В то же время данные открытого исследования работы дизельного двигателя показывают, что при доле пиролизного масла свыше примерно 40%, наблюдается ухудшение физических и самовоспламеняющихся свойств смеси, а значит, наиболее рациональным остаётся применение умеренных долей подготовленного пиролизного компонента [24].

Другим перспективным направлением является использование пиролизного масла как сырья для последующей химической переработки. Открытый обзор 2025 года в PMC подчёркивает, что пиролитическое сжижение пластмасс рассматривается как способ получения химического сырья, включая топливные фракции, и анализирует не только лабораторные исследования, но и промышленные проекты по переработке пластиков в жидкие углеводородные продукты. Это особенно важно для темы данной статьи, поскольку показывает, что ценность пиролизного масла определяется не только возможностью его сжигания, но и его ролью как промежуточного сырья в рамках химического рециклинга и циркулярной экономики пластмасс [25].

Наиболее перспективными направлениями применения пиролизного масла из отходов полиэтилена являются его использование после подготовки в составе смесевых топлив, выделение целевых фракций для дальнейшего топливного применения, а также вовлечение в цепочки химической переработки в качестве углеводородного сырья. Такой подход в большей степени соответствует современным представлениям о химическом рециклинге пластмасс, чем прямое использование необработанного пиролизного продукта [23, 25].

Примеры промышленного применения и интеграции технологии. Практическая реализуемость пиролиза пластиковых отходов подтверждается эксплуатацией промышленных и демонстрационных установок, а также развитием инфраструктуры для последующей переработки получаемого пиролизного масла. При этом реальные проекты показывают, что жидкий продукт пиролиза может использоваться по двум основным направлениям: как компонент топлива после дополнительной подготовки либо как промежуточное углеводородное сырьё для получения химических продуктов и новых полимерных материалов.

Одним из примеров промышленного применения является предприятие Hintes Oil Europe, расположенное в Альмерии, Испания. Данный объект был рассмотрен Vinci et al. в качестве практического кейса при проведении оценки жизненного цикла производства пиролизного масла. В исследуемом процессе использовалась смесь пластиковых отходов, включающая 50% полиэтилена, 25% полипропилена и 25% полистирола. При переработке 91.38 кг/ч пластиковых отходов производительность по пиролизному маслу составляла 78.41 кг/ч. Неконденсируемые газы и твёрдые углеродистые продукты частично использовались для покрытия тепловой потребности процесса. Полученное масло имело теплотворную способность 44.26 МДж/кг и рассматривалось как продукт, пригодный для частичного замещения традиционного дизельного топлива после оценки его эксплуатационных характеристик [26].

Другим примером являются промышленные установки компании Plastic Energy в Альмерии и Севилье, Испания. По данным компании, установки эксплуатируются соответственно с 2016 и 2017 гг. В процессе TAC смешанные пластиковые отходы подвергаются нагреву в отсутствие кислорода с образованием углеводородных паров, которые затем конденсируются в жидкий продукт TACOIL. В отличие от прямого использования в качестве топлива, данный продукт применяется как вторичное углеводородное сырьё для производства новых пластиковых материалов. Компания указывает, что TACOIL с двух испанских установок был коммерциализирован на европейском рынке и использован при выпуске упаковочной продукции [27].

Показательным примером интеграции химического рециклинга с нефтеперерабатывающей инфраструктурой является технология ReOil® компании OMV. В марте 2025 г. на территории нефтеперерабатывающего завода в Швехате, Австрия, была введена в эксплуатацию установка производительностью до 16 000 т трудно перерабатываемых смешанных пластиковых отходов в год. Технология предусмат-

ривает превращение постпотребительских пластиковых отходов в пиролизное масло, которое используется как сырьё для получения базовых химических продуктов. Интеграция установки с действующим нефтеперерабатывающим комплексом позволяет вовлекать жидкий продукт пиролиза в существующую технологическую цепочку и снижать потребность в первичном ископаемом сырьё [28].

Отдельное значение имеет развитие промышленных мощностей для облагораживания пиролизного масла. В марте 2026 г. компания Neste ввела в эксплуатацию на нефтеперерабатывающем заводе в Порвоо, Финляндия, установку подготовки сжиженных пластиковых отходов производительностью до 150 000 т в год. Данный объект не является установкой первичного пиролиза: он предназначен для улучшения качества жидких продуктов термохимической переработки пластиков, включая пиролизное масло. После облагораживания продукт совместно перерабатывается с традиционным углеводородным сырьём на действующем нефтеперерабатывающем предприятии и используется для получения сырья, соответствующего требованиям нефтехимической промышленности [29].

Рассмотренные примеры показывают, что промышленное развитие пиролиза пластиковых отходов происходит преимущественно по пути интеграции с существующей нефтеперерабатывающей и нефтехимической инфраструктурой. Хотя отдельные исследования подтверждают возможность применения пиролизного масла в составе смесевых топлив, в промышленных проектах значительное внимание уделяется его использованию как промежуточного сырья. Такой подход позволяет проводить дополнительную очистку и облагораживание продукта, стабилизировать его свойства и получать химические материалы с более высокой добавленной стоимостью.

Для систематизации рассмотренных промышленных проектов в таблице 4 представлены примеры действующих и демонстрационных установок пиролиза пластиковых отходов, а также объектов последующей подготовки получаемого жидкого продукта.

Таблица 4 - Примеры промышленного применения и интеграции технологии пиролиза пластиковых отходов

Компания и местоположение	**Сырьё или промежуточный продукт**	**Технология и назначение продукта**	**Масштаб или производительность**	**Практическое значение**
Hintes Oil Europe, Альмерия, Испания [26].	Смесь пластиковых отходов: 50% PE, 25% PP и 25% PS	Пиролиз с получением жидкого продукта, потенциально пригодного для применения как компонента топлива	91.38 кг/ч пластиковых отходов; 78.41 кг/ч пиролизного масла	Пример промышленного производства пиролизного масла с частичным использованием побочных продуктов для покрытия тепловой потребности процесса
Plastic Energy, Альмерия и Севилья, Испания [27].	Смешанные пластиковые отходы	Процесс TAC с получением TACOIL; продукт используется как вторичное углеводородное сырьё для производства новых пластиков	Промышленные установки эксплуатируются с 2016 и 2017 гг. соответственно	Подтверждает возможность коммерциализации жидкого продукта химичес-кого рециклинга на европейском рынке
OMV, нефтеперерабатывающий завод в Швехате, Австрия [28].	Трудно перерабатываемые смешанные пластиковые отходы	Технология ReOil® с получением пиролизного масла как сырья для производства базовых химических продуктов	До 16 000 т пластиковых отходов в год; установка введена в эксплуатацию в 2025 г.	Пример интеграции пиролиза с действующей нефтеперерабатывающей инфраструктурой

Компания и местоположение	**Сырьё или промежуточный продукт**	**Технология и назначение продукта**	**Масштаб или производительность**	**Практическое значение**
Neste, нефтеперерабатывающий завод в Порвоо, Финляндия [29].	Сжиженные пластиковые отходы, включая пиролизное масло	Облагораживание жидкого продукта и совместная переработка с традиционным углеводородным сырьём	До 150 000 т жидкого сырья в год; установка введена в эксплуатацию в 2026 г.	Показывает про-мышленное масшта-бирование стадии подготовки пиро-лизного масла к нефтехимическому использованию

Как видно из таблицы 4, реальные промышленные проекты развиваются преимущественно по пути интеграции пиролиза с действующей нефтеперерабатывающей и нефтехимической инфраструктурой. Получаемое пиролизное масло в большинстве случаев рассматривается не как готовое моторное топливо для прямого применения, а как промежуточное углеводородное сырьё, требующее дополнительной подготовки и дальнейшей переработки. Рассмотренные примеры также показывают, что промышленное внедрение включает не только стадию первичного пиролиза, но и развитие мощностей по облагораживанию жидкого продукта.

Экологические и экономические аспекты применения технологии. Оценка перспектив использования пиролизного масла из отходов полиэтилена не должна ограничиваться анализом выхода жидкой фракции и её физико-химических свойств. Для определения практической целесообразности технологии необходимо учитывать экологические последствия полного жизненного цикла, энергозатраты на проведение процесса, затраты на подготовку сырья и последующую очистку продукта, масштаб установки, возможность использования побочных продуктов и особенности конкретного потока пластиковых отходов.

Одним из инструментов комплексной экологической оценки является анализ жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA). В исследовании Vinci et al. выполнена LCA-оценка промышленного предприятия по производству пиролизного масла в Альмерии, Испания. В качестве сырья использовалась смесь пластиковых отходов, включающая 50% полиэтилена, 25% полипропилена и 25% полистирола. Авторы установили, что производство 1 л пиролизного масла сопровождается образованием около 0.032 кг CO_2-экв. и потреблением около 0.031 м^3 воды. При сравнении с ископаемым дизельным топливом снижение воздействия было отмечено в 17 из 18 рассмотренных категорий. Кроме того, в рамках данного промышленного кейса химическая переработка продемонстрировала более благоприятные показатели по сравнению с захоронением и сжиганием пластиковых отходов [26].

Вместе с тем указанные результаты не следует автоматически распространять на все установки пиролиза. Экологическая эффективность зависит от состава сырья, источника энергии, аппаратурного оформления процесса и способа учёта предотвращённых воздействий. В исследовании Yadav et al. выполнен технико-экономический анализ и LCA для концептуальной установки каталитического быстрого пиролиза смешанных пластиковых отходов производительностью 240 т/сут. Авторы установили, что использование отходов вместо ископаемого сырья способно снизить расход невозобновляемых ресурсов и совокупное энергопотребление цепочки поставок. Однако для базового варианта получения бензола, толуола и ксилолов выбросы парниковых газов оказались выше по сравнению с традиционным нефтехимическим производством. Причинами названы значительные затраты энергии и ресурсов на подготовку сырья, производство холода, пара и электроэнергии, а также разделение продуктов [30].

Сопоставление результатов данных исследований показывает, что экологическая оценка пиролиза зависит от выбранного сценария. В одном случае основным продуктом является пиролизное масло, рассматриваемое как частичная замена дизельного топлива, а в другом нефтехимические продукты, требующие более глубокой переработки и разделения.

Следовательно, при оценке технологии необходимо учитывать не только выход жидкой фракции, но и дальнейший маршрут её использования. Дополнительное значение имеют возможность утилизации неконденсируемых газов для обеспечения процесса теплом, использование тяжёлых углеводородных фракций, а также интеграция установки с действующими нефтеперерабатывающими или нефтехимическими объектами [26], [30].

Экономическая эффективность пиролиза также в значительной степени определяется масштабом производства. В работе Fivga и Dimitriou выполнено моделирование установки переработки пластиковых отходов производительностью 100 кг/ч с использованием программного комплекса Aspen HYSYS. Для малотоннажного варианта расчётная себестоимость топливного продукта составила 0.87 фунта стерлингов за килограмм, что на 58% превышало рассматриваемую авторами рыночную цену. Вместе с тем расчёты для более крупных установок показали существенное снижение удельных затрат за счёт эффекта масштаба [31].

Похожая закономерность прослеживается в исследовании Yadav et al. Авторы отмечают, что ключевыми факторами стоимости являются цена и предварительная подготовка пластикового сырья, капитальные затраты на разделение продуктов, эксплуатационные расходы, стоимость катализатора и возможность реализации сопутствующих продуктов. Согласно результатам чувствительного анализа, увеличение производительности моделируемой установки с 240 до 500 т/сут способно снизить минимальную цену реализации целевого продукта приблизительно на 14%. При этом экономическая эффективность может дополнительно повышаться при интеграции процессов разделения с существующей нефтехимической инфраструктурой [26].

Согласно выводам, Joint Research Centre Европейской комиссии, выбор предпочтительного способа обращения с пластиковыми отходами должен основываться на совокупности трёх критериев: максимизации возврата материала при минимизации воздействия переработки, технической пригодности метода для конкретного потока отходов и экономической реализуемости проекта. Пиролиз в связи с этим не следует рассматривать как универсальную замену механической переработке. Его применение наиболее оправдано для тех потоков полиолефиновых отходов, которые трудно вовлечь в механический рециклинг вследствие загрязнения, смешанного состава или ухудшения свойств материала [32].

Пиролиз полиэтиленовых отходов обладает значительным потенциалом, однако экологические и экономические преимущества технологии не являются безусловными. Практическая эффективность определяется сочетанием факторов: качеством и стабильностью сырьевого потока, энергопотреблением, производительностью установки, возможностью использования побочных продуктов, необходимой глубиной очистки пиролизного масла и наличием инфраструктуры для дальнейшей переработки. Наиболее перспективным представляется интегрированный подход, при котором пиролиз дополняет механическую переработку и применяется преимущественно для сложных потоков пластиковых отходов.

Сравнение пиролиза с альтернативными методами обращения с пластиковыми отходами. Оценка перспектив пиролиза полиэтиленовых отходов требует сопоставления данной технологии с другими способами переработки и утилизации пластмасс. Согласно данным Joint Research Centre Европейской комиссии, выбор предпочтительного метода должен основываться на трёх основных критериях: максимизации возврата материала при минимизации воздействия процесса на окружающую среду, технической пригодности технологии для конкретного сырьевого потока и экономической реализуемости проекта [32].

Наиболее распространённым способом вовлечения пластиковых отходов во вторичный оборот остаётся механическая переработка. Она включает сортировку, измельчение, очистку и повторное формование полимерного материала. Преимуществами данного подхода являются относительная технологическая простота и сохранение полимера как материала. Однако его применение ограничивается требованиями к чистоте и однородности исходного сырья. Загрязнённые, смешанные или многослойные отходы, а также материалы с ухудшенными эксплуатационными свойствами могут быть менее пригодны для механического рециклинга [32].

Физическая переработка, также называемая переработкой с использованием растворителей или селективным растворением, позволяет отделять полимер от примесей без полного разрушения его макромолекулярной структуры. Этот подход может быть полезен для отдельных сложных потоков отходов, однако требует применения растворителей, их последующего отделения и регенерации. В связи с этим экологическая и экономическая эффективность метода зависит от энергопотребления и организации оборота растворителя [32].

Пиролиз относится к методам химической переработки и заключается в термическом разложении полимеров с образованием жидких углеводородов, неконденсируемых газов и твёрдого остатка. В отличие от механической переработки, пиролиз позволяет вовлекать в переработку часть смешанных и трудно перерабатываемых полиолефиновых отходов.

Его основным преимуществом является получение жидкого углеводородного продукта, который после предварительной подготовки может использоваться как топливный компонент или как промежуточное сырьё для нефтехимии. Одновременно технология требует значительных энергозатрат, контроля состава сырья и последующей подготовки пиролизного масла [32].

Другим термохимическим методом является газификация. В данном процессе пластиковые отходы преобразуются преимущественно в синтез-газ, содержащий оксид углерода и водород. Синтез-газ может использоваться для получения энергии или химических продуктов. Однако газификация проводится при более жёстких условиях, требует сложного оборудования и очистки газообразного продукта. По этой причине её применение связано с дополнительными технологическими и экономическими барьерами [32].

Энергетическая утилизация путём сжигания позволяет сократить объём отходов и получить тепловую или электрическую энергию. Однако при таком подходе углеводородное сырьё утрачивается как материал, а содержащийся в пластике ископаемый углерод переходит в выбросы диоксида углерода. Согласно результатам оценки Joint Research Centre, по показателю воздействия на изменение климата механическая, физическая и химическая переработка в рассмотренных сценариях предпочтительнее энергетической утилизации. Вместе с тем для отдельных категорий воздействия, не связанных непосредственно с изменением климата, преимущество переработки не всегда является однозначным, особенно для энергоёмких пиролизных процессов [32].

Что касается пиролиза, то его не следует рассматривать в качестве замены механической обработке. Комбинированный подход является наиболее рациональным: целесообразно направлять относительно чистые и однородные полиэтиленовые отходы на механическую переработку, тогда как пиролиз может быть использован в качестве дополнительного метода переработки смешанных и сложных потоков полиолефинов, которые трудно поддаются механической переработке.

Сравнительная характеристика основных методов представлена в таблице 5.

Таблица 5 - Сравнение основных методов обращения с пластиковыми отходами в контексте переработки полиэтилена

Метод	Сущность	Основные преимущества	Ограничения	Основной результат	Наиболее подходящая область применения
Механическая переработка	Сортировка, измельчение, очистка и повторное формование полимерного материала	Сохранение полимера как материала; относительная технологическая простота; возможность получения вторичного полимера	Требования к чистоте и однородности сырья; ухудшение свойств материала при повторных циклах; ограниченная пригодность смешанных и загрязнённых отходов	Вторичный полимерный материал	Чистые и относительно однородные потоки полиэтиленовых отходов
Физическая переработка с использованием растворителей	Селективное растворение полимера с его последующим отделением и восстановлением	Возможность отделения полимера от части примесей; сохранение макромолекулярной структуры	Необходимость использования и регенерации растворителей; дополнительные энергозатраты; зависимость эффективности от состава сырья	Очищенный полимерный материал	Отдельные сложные потоки отходов, для которых механическая переработка недостаточно эффективна
Пиролиз	Термическое разложение полимеров в отсутствие кислорода	Получение жидких углеводородных продуктов; возможность переработки части смешан-	Энергоёмкость; нестабильность состава масла; образование газа, тяжёлых продуктов и кокса;	Пиролизное масло, неконденсируемый газ и твёрдый остаток	Смешанные и трудно перерабатываемые полиолефиновые отходы, ограни-

Метод	Сущность	Основные преимущества	Ограничения	Основной результат	Наиболее подходящая область применения
		ных полиолефиновых отходов; получение промежуточного сырья для топливного или нефтехимического применения	необходимость дистилляции или иной подготовки жидкого продукта		ченно пригодные для механического рециклинга
Газификация	Высокотемпературное термохимическое превращение отходов в газообразный продукт	Получение синтез-газа как сырья для энергетического или химического применения	Высокие температуры; сложность аппаратурного оформления; необходимость очистки газа; экономические ограничения	Синтез-газ	Сложные потоки отходов при наличии инфраструктуры для дальнейшего использования синтез-газа
Энергетическая утилизация путём сжигания	Термическое уничтожение отходов с получением тепла и электроэнергии	Значительное сокращение объёма отходов; получение энергии; технологическая освоенность	Потеря углеводородного сырья как материала; выбросы диоксида углерода; невозможность возврата полимера в хозяйственный оборот	Тепловая и электрическая энергия	Остаточные потоки отходов, для которых переработка технически или экономически затруднена

Как видно из таблицы 5, каждый метод занимает собственное место в системе обращения с пластиковыми отходами. Механическая переработка сохраняет полимерный материал и остаётся предпочтительным направлением для сравнительно чистых потоков сырья. Пиролиз приобретает особое значение для тех полиолефиновых отходов, которые трудно перерабатывать механическими способами. Его практическая ценность заключается не в замещении других методов, а в расширении общего спектра перерабатываемых пластиковых отходов и получении жидкого углеводородного сырья для дальнейшего использования.

Ограничения технологии и проблемы промышленного внедрения. Несмотря на значительный потенциал пиролиза полиэтиленовых отходов, практическое внедрение данной технологии связано с рядом ограничений. К ним относятся неоднородность поступающего сырья, нестабильность состава пиролизного масла, широкий фракционный диапазон жидкого продукта, образование тяжёлых компонентов и кокса, дезактивация катализаторов, повышенные энергозатраты и необходимость последующей подготовки масла перед его использованием в качестве компонента топлива.

Одной из ключевых проблем является неоднородность пластиковых отходов. В лабораторных исследованиях часто применяются чистые образцы HDPE, LDPE или LLDPE с известным составом. В реальных условиях сырьевой поток может содержать смеси полимеров, остатки органических веществ, красители, наполнители и другие примеси. Даже незначительное содержание нежелательных компонентов способно влиять на распределение продуктов, стабильность процесса и качество пиролизного масла. В частности, присутствие поливинилхлорида в смешанных пластиковых отходах может привести к поступлению хлорсодержащих соединений в продукты пиролиза и отложениям примесей на поверхности катализатора. Поэтому промышленное внедрение требует организации предварительной сортировки и контроля качества исходного сырья [25, 32].

Другим ограничением является нестабильность свойств получаемого жидкого продукта. Пиролизное масло представляет собой сложную смесь углеводородов с широким диапазоном температур кипения. Его состав зависит от вида полимера, температуры, скорости нагрева, давления, времени пребывания паров, конструкции реактора и условий конденсации. В сравнении с товарным ди-

зельным топливом сырое пиролизное масло может характеризоваться повышенной вязкостью и плотностью, пониженной температурой вспышки, наличием непредельных соединений и изменчивостью эксплуатационных показателей. В связи с этим прямое использование необработанного продукта в двигателях ограничено. Для повышения качества необходимы дистилляция, гидрообработка или смешение с традиционными нефтяными топливами [6, 19, 21].

Особое значение имеет проблема дезактивации катализаторов. При каталитическом пиролизе контакт углеводородных фрагментов с активной поверхностью способствует более глубокому расщеплению полимерных цепей и формированию целевых продуктов. Одновременно на поверхности и внутри пор катализатора могут накапливаться углеродистые отложения. Образование кокса снижает доступность активных центров и постепенно уменьшает каталитическую активность. На интенсивность данного процесса влияют структура и кислотность катализатора, температура, состав сырья, время контакта и конструкция реактора [13].

Дезактивированный катализатор может подвергаться регенерации. К основным методам удаления коксовых отложений относятся окисление воздухом или кислородом, газификация с использованием диоксида углерода или водяного пара, а также гидрирование. Наиболее распространённым промышленным подходом является окислительная регенерация. Однако чрезмерно высокая температура восстановления активности способна вызвать необратимое изменение структуры катализатора, снижение числа активных центров и ухудшение его дальнейших эксплуатационных свойств.

Следовательно, применение катализаторов повышает качество продуктов пиролиза, но одновременно увеличивает технологическую сложность процесса и создаёт дополнительные требования к регенерации и повторному использованию каталитического материала [13].

Выбор конструкции реактора также влияет на возможность промышленного масштабирования. В реакторах с неподвижным слоем расплавленный пластик и тяжёлые продукты могут затруднять тепло- и массообмен и создавать риск закупоривания аппарата. Реакторы с псевдоожиженным слоем обеспечивают более интенсивное перемешивание, равномерный нагрев и улучшенный контакт сырья с катализатором, однако требуют более сложного контроля гидродинамического режима. Таким образом, результаты лабораторных экспериментов, проведённых в периодических установках, не могут автоматически переноситься на непрерывные промышленные процессы без дополнительной проверки и масштабирования [12, 13].

Существенным ограничением остаётся энергоёмкость технологии. Пиролиз требует затрат тепловой энергии на нагрев сырья, а последующая подготовка масла дополнительных ресурсов на охлаждение, разделение, дистилляцию и, при необходимости, гидрообработку. Часть энергозатрат может компенсироваться использованием неконденсируемых газов процесса, однако итоговая экологическая и экономическая эффективность зависит от масштаба установки, источника энергии, состава сырья и глубины дальнейшей переработки жидкого продукта [26, 30, 31].

Отдельной проблемой является разрыв между лабораторными исследованиями и промышленной реализацией. В лабораторных условиях изучается пиролиз широкого спектра пластиков и многочисленных каталитических систем. В промышленных проектах чаще используются сравнительно распространённые и технологически удобные виды сырья, а применение катализаторов ограничивается требованиями к их стабильности, стоимости и возможности многократной регенерации. Для расширения промышленного применения пиролиза необходимы устойчивые и экономически доступные катализаторы, эффективные системы подготовки сырья и оптимизированные конструкции реакторов [25].

Этим объясняется то, что пиролиз полиэтиленовых отходов не следует рассматривать как универсальное решение проблемы накопления пластика. Технология обладает значительным потенциалом, но её практическая эффективность определяется сочетанием факторов: качеством сырья, стабильностью процесса, выходом и составом масла, энергопотреблением, стабильностью катализатора, глубиной последующей подготовки продукта и возможностью интеграции с существующей нефтеперерабатывающей или нефтехимической инфраструктурой. Наиболее разумным подходом является использование пиролиза в качестве дополнительного метода переработки тех потоков полиэтиленовых отходов, которые трудно поддаются механической обработке.

Выводы. Проведённый анализ показывает, что отходы полиэтилена являются перспективным сырьём для получения жидких углеводородных про-

дуктов методом пиролиза. Актуальность данного направления связана с ростом объёмов пластиковых отходов, низким уровнем их переработки и необходимостью вовлечения углеродсодержащих материалов во вторичный хозяйственный оборот. Пиролиз в данном случае рассматривается не только как способ утилизации отходов, но и как технология получения ценного промежуточного продукта.

Установлено, что при пиролизе полиэтиленовых отходов возможно получение жидкой фракции с высокой теплотворной способностью и характеристиками, частично близкими к свойствам традиционных жидких топлив. Это подтверждает энергетический потенциал пиролизного масла и его практическую значимость. Вместе с тем свойства получаемого продукта зависят от состава исходного сырья, температурного режима, скорости нагрева и условий проведения процесса, что оказывает существенное влияние на выход жидкой фракции и её качество.

Анализ физико-химических свойств пиролизного масла показал, что, несмотря на близость отдельных показателей к дизельному топливу, его прямое использование в качестве готового моторного топлива ограничено. Основными причинами являются широкий фракционный состав, нестабильность свойств и несоответствие части эксплуатационных характеристик требованиям, предъявляемым к товарным нефтяным топливам.

Вместе с тем промышленное внедрение технологии требует решения вопросов стабильности сырьевого потока, снижения энергоёмкости, предотвращения коксообразования, повышения срока службы катализаторов и стандартизации качества получаемого пиролизного масла.

Наиболее рациональным направлением практического применения пиролизного масла из отходов полиэтилена является его использование после предварительной подготовки. По литературным данным, дистилляция позволяет улучшить характеристики пиролизного продукта за счёт выделения более узких фракций, а смешение дистиллированного продукта с коммерческим дизельным топливом повышает его эксплуатационную пригодность. В связи с этим пиролизное масло целесообразно рассматривать прежде всего, как промежуточный углеводородный продукт, пригодный для дальнейшей топливной или химической переработки.

Пиролиз отходов полиэтилена представляет собой перспективное направление химического рециклинга пластиковых отходов. Практическая ценность данной технологии заключается в возможности одновременного решения экологической задачи по снижению объёмов пластиковых отходов и ресурсной задачи по получению жидких углеводородных продуктов, пригодных для дальнейшего использования после соответствующей подготовки.

Литература

1. Houssini K., Li J. Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis//Commun Earth Environment. −2025. -Vol.6: 257. DOI 10.1038/s43247-025-02169-5.
2. Ranger S. Plastic recycling rates are stubbornly low: Here's what's going wrong//SCI. −2025. URL:https://www.soci.org/news/2025/4/plastics-recycling-rates-are-stagnating-heres-why. Date accessed: 01.04.2026.
3. Laghezza M., Fiore S., Berruti F. A review on the pyrolytic conversion of plastic waste into fuels and chemicals //Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. −2024. -Vol.179:106479. DOI 10.1016/j.jaap.2024.106479.
4. Hasan M.M., Haque R., Jahirul M.I., Rasul M.G. Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts//Energy Conversion and Management. −2025. Vol.326: 119511. DOI 10.1016/j.enconman.2025.119511.
5. Wijayanti W., Musyaroh M., Sasongko M.N. Low-Density Polyethylene Plastic Waste to Liquid Fuel Using Pyrolysis Method: An Effect of Temperatures on the Oil Yields Physicochemical Properties//Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2022. -Vol.10(3):1090402. DOI 10.13044/j.sdewes.d9.0402.
6. Faisal F., Rasul M.G., Jahirul M.I., Chowdhury A.A. Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics//Science of The Total Environment. −2023. Vol.886:163756. DOI 10.1016/j.scitotenv.2023.163756.
7. Pumpuang A., Klinkaew N., Wathakit K., Sukhom A., Sukjit E. The influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance// RSC advances. −2024. -Vol. 14(14). -P. 10070-10087. DOI 10.1039/d3ra08150h.

8. Javed N., Muhammad S., Iram S., et.al. Analysis of Fuel Alternative Products Obtained by the Pyrolysis of Diverse Types of Plastic Materials Isolated from a Dumpsite Origin in Pakistan// Polymers. 2023.-Vol.15(1):24. DOI 10.3390/polym15010024.
9. Yaqoob H., Muhammad Ali H., Khalid U. Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: a review of key factors//RSC Sustainability. 2024. -Vol.3(1). -P.208-218. DOI 10.1039/D4SU00504J.
10. Xuan W., Yan S., Dong Y. Exploration of Pyrolysis Behaviors of Waste Plastics (Polypropylene Plastic/Polyethylene Plastic/Polystyrene Plastic): Macro-Thermal Kinetics and Micro-Pyrolysis Mechanism// Processes. −2023. -Vol. 11(9): 2764. DOI 10.3390/pr11092764.
11. Riesco-Avila J.M., Vera-Rozo J.R., et.al. Effects of Heating Rate and Temperature on the Yield of Thermal Pyrolysis of a Random Waste Plastic Mixture//Sustainability. −2022.-Vol.14(15): 9026. DOI: 10.3390/su14159026.
12. Paavani K., Agarwal K., Alam S.S., Dinda S., Abrar I. Advances in plastic to fuel conversion: reactor design, operational optimization, and machine learning integration // Sustainable Energy & Fuels. −2025. Vol. 9(1). -P. 54-71. DOI 10.1039/D4SE01045K.
13. Daligaux V., Richard R., Manero M.-H. Deactivation and Regeneration of Zeolite Catalysts Used in Pyrolysis of Plastic Wastes-A Process and Analytical Review// Catalysts. −2021. -Vol. 11(7): 770. DOI 10.3390/catal11070770.
14. Ghodke P.K., Sharma A.K., Moorthy K., Chen W.-H., Patel A., Matsakas L. Experimental Investigation on Pyrolysis of Domestic Plastic Wastes for Fuel Grade Hydrocarbons// Processes. −2023. -Vol. 11(1): DOI 10.3390/pr11010071.
15. Kanattukara, B.V., Singh, G., Sarkar, P. et al. Catalyst-mediated pyrolysis of waste plastics: tuning yield, composition, and nature of pyrolysis oil// Environmental Science and Pollution Research. −2023. Vol. 30. -P. 64994-65010. DOI 10.1007/s11356-023-27044-8.
16. Tran T.T., Tran H.Q., Tran D.H., Nguyen T.N., Phung T.K., Do T.C. The effect of reaction conditions and catalysts on the pyrolysis of polyethylene// Journal of Science and Technology Development. −2024. Vol. 27(2). -P.3375-3384. DOI 10.32508/stdj.v27i2.4251.
17. Zhang Y., Chen X., Cheng L., Gu J., Xu Y. Conversion of Polyethylene to High-Yield Fuel Oil at Low Temperatures and Atmospheric Initial Pressure// International Journal of Environmental Research and Public Health. −2023. -Vol. 20(5): 4048. DOI 10.3390/ijerph20054048.
18. Xie X., Wang M., Mao N., et.al. Bridging plastic recycling and clean energy production: hydrogen-free catalytic pyrolysis of polyethylene over $CuMgAlO_x$ for high-yield diesel fuel generation//Green Chemistry. −2025.-Vol. 27(26). -P.7887-7896. DOI 10.1039/D5GC01967B.
19. Faisal F., Rasul M.G., Chowdhury A.A., et.al. Uncovering the differences: A comparison of properties of crude plastic pyrolytic oil and distilled and hydrotreated plastic diesel produced from waste and virgin plastics as automobile fuels //Fuel. −2023. -Vol. 350:128743. DOI 10.1016/j.fuel.2023.128743.
20. Gala A., Guerrero M., Guirao B., et al. Characterization and Distillation of Pyrolysis Liquids Coming from Polyolefins Segregated of MSW for Their Use as Automotive Diesel Fuel//Energy. −2020. Vol.34(5). -P.5969-5982. DOI 10.1021/acs.energyfuels.0c00403.
21. Hafeez S., Van Haute M., Manos G., et.al. Hydrotreatment over the Pt/Al2O3 Catalyst of Polyethylene-Derived Pyrolysis Oil and Wax//Energy and Fuels. −2023. -Vol.37(20). -P. 16181-16185. DOI 10.1021/acs.energyfuels.3c03152.
22. Yaqoob H., Muhammad Ali H., Sajjad U., Hamid K. Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis//Results in Engineering. −2024. -Vol.24: 103336. DOI 10.1016/j.rineng.2024.103336.
23. Erkmen B., Ozdogan A., Ezdesir A., Celik G. Can Pyrolysis Oil Be Used as a Feedstock to Close the Gap in the Circular Economy of Polyolefins //Polymers. −2023. -Vol.15(4): 859. DOI 10.3390/polym15040859.
24. Januszewicz K., Hunicz J., Kazimierski P., Rybak A., et.al. An experimental assessment on a diesel engine powered by blends of waste-plastic-derived pyrolysis oil with diesel// Energy. −2023. Vol.281:128330. DOI 10.1016/j.energy.2023.128330.
25. Kumagai S, Fujiwara K, Nishiyama T, Saito Y, Yoshioka T. Chemical Feedstock Recovery Through Plastic Pyrolysis: Challenges and Perspectives Toward a Circular Economy// ChemSusChem. −2025. Vol.18(16): e202500210. DOI10.1002/cssc.202500210.

26. Vinci G., Gobbi L., Porcaro D., Pinzi S., Carmona-Cabello M., Ruggeri M. Environmental Evaluation of Chemical Plastic Waste Recycling: A Life Cycle Assessment Approach// Resources. −2024. -Vol.13(12): 176. DOI 10.3390/resources13120176.
27. Plastic Energy. Operations: Almeria and Seville advanced recycling plants. URL: https://plasticenergy.com/operations/. - Date accessed: 01.04.2026.
28. OMV. OMV unveils innovative ReOil® plant to transform end-of-life plastics into circular feedstocks. −2025. URL: https://www.omv.com/en/media/press-releases/2025/250318-omv-unveils-innovative-reoil-plant-to-transform-end-of-life-plastics-into-circular-feedstocks. Date accessed: 01.04.2026.
29. Neste. Neste commissions the world's largest upgrading facility for liquefied waste plastic and scales up chemical recycling. −2026. URL: https://www.neste.com/news/neste-commissions-the-worlds-largest-upgrading-facility-for-liquefied-waste-plastic-and-scales-up-chemical-recycling. Date accessed: 01.04.2026.
30. Yadav G., Singh A., Dutta A., Uekert T., DesVeaux J.S., Nicholson S.R., Tan E.C.D., Mukarakate C., Schaidle J.A., Wrasman C.J., Carpenter A.C., Baldwin R.M., Román-Leshkov Y., Beckham G.T. Techno-economic analysis and life cycle assessment for catalytic fast pyrolysis of mixed plastic waste // Energy & Environmental Science. −2023. -Vol. 16(9). P. 3638–3653. DOI 10.1039/D3EE00749A.
31. Fivga A., Dimitriou I. Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment// Energy. −2018. Vol. 149. -P. 865-874, DOI 10.1016/j.energy.2018.02.094
32. García-Gutiérrez, Pelayo & Amadei, Andrea & Klenert, David & Nessi, Simone & Tonini, Davide & Tosches, Davide & Ardente, Fulvio & Saveyn, Hans. Environmental and economic assessment of plastic waste recycling and energy recovery pathways in the EU// Resources Conservation and Recycling. −2025. -Vol. 215:108099. DOI 10.1016/j.resconrec.2024.108099.

Сведения об авторах

Джасакбаев А.Т.-магистрант, Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан, e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com;

Султамуратова З.Б.-кандидат химических наук, ассистент-профессор, Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан, e-mail: zadasb@mail.ru;

Карешова Ж.К.-преподователь, Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева, Атырау, Казахстан, e-mail: zh.kareshova@mail.ru;

Жумабекова А.К. - ассоциированный профессор, кандидат химических наук, Казахский, университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Астана, Казахстан, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru.

Information about the authors

Jassakbayev A.-Master's student, Safi Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: alikhanjassakbayev@gmail.com;

Sultamuratova Z.-Candidate of Chemical Sciences, Safi Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: zadasb@mail.ru;

Kareshova Zh.-Teacher Safi Utebayev Atyrau University of Oil and Gas, Atyrau, Kazakhstan, e-mail: zh.kareshova@mail.ru;

Zhumabekova A. - Candidate of chemical sciences, Associate Professor, K.Kulazhanov Kazakh university of technology and business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru.