

УДК 628.4: 678.746.22: 66.092-977: 665.71

МРНТИ 61.61.91

DOI: [10.54859/kjogi108982](https://doi.org/10.54859/kjogi108982)

Получена: 06.05.2026.

Одобрена: 22.05.2026.

Опубликована: 30.06.2026.

Научный обзор

Анализ влияний технологических параметров на формирование жидких продуктов при пиролизе полистирольных отходов

Е.М. Кизатов, Р.М. Дюсова, Э.Е. Копишев, О.Е. Калиев

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется процесс термической переработки отходов полистирола как эффективная альтернатива традиционной механической утилизации. Учитывая рост объёмов пластиковых отходов и сложность переработки вспененных материалов, был проведён анализ современных публикаций, посвящённых влиянию технологических параметров процесса на выход и состав жидких продуктов пиролиза. Особое внимание уделено воздействию температуры, продолжительности процесса в реакционной зоне. На основании анализа было установлено, что наиболее рациональным температурным режимом является диапазон 400–500°C. Именно в этих условиях достигается максимальный выход жидкой фракции, обогащённой ценными ароматическими соединениями: стиролом, бензолом, толуолом и этилбензолом. В результате выявлено, что отклонение от оптимальных температур ведёт либо к неполной деструкции полимера, либо к избыточному газообразованию. Отмечены преимущества пиролиза при переработке загрязнённых и вспененных полистирольных материалов. Дополнительно подчёркнута важность повышения эффективности технологий переработки полимерных отходов в условиях роста экологической нагрузки. Сделан вывод о высокой перспективности технологии для получения химического сырья и развития экономики замкнутого цикла при условии совершенствования систем сортировки, очистки и последующего фракционирования продуктов пиролиза.

Ключевые слова: переработка, пиролиз, полистирол, температура процесса, продолжительность процесса.

Как цитировать:

Кизатов Е.М., Дюсова Р.М., Копишев Э.Е., Калиев О.Е. Анализ влияний технологических параметров на формирование жидких продуктов при пиролизе полистирольных отходов // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2026. Том 8, №2. С. 105–118. DOI: [10.54859/kjogi108982](https://doi.org/10.54859/kjogi108982).

UDC 628.4: 678.746.22: 66.092-977: 665.71

CSCSTI 61.61.91

DOI: [10.54859/kjogi108982](https://doi.org/10.54859/kjogi108982)

Received: 06.05.2026.

Accepted: 22.05.2026.

Published: 30.06.2026.

Review article

Analysis of the Influence of Process Parameters on the Formation of Liquid Products During the Pyrolysis of Polystyrene Waste

Yessmagambet M. Kizatov, Rizagul M. Dyussova, Eldar Ye. Kopishev, Olzhas Ye. Kaliyev

Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

This study examines the thermal treatment of polystyrene waste as an effective alternative to conventional mechanical recycling. Given the growing volume of plastic waste and the complexity of processing foamed materials, an analysis was conducted of recent publications on the influence of process parameters on the yield and composition of liquid pyrolysis products. Particular attention was paid to the effects of temperature and residence time in the reaction zone. Based on the analysis, it was established that the most optimal temperature range is 400–500°C. It is under these conditions that the maximum yield of the liquid fraction, enriched with valuable aromatic compounds, including styrene, benzene, toluene, and ethylbenzene is achieved. As a result, it was found that deviations from the optimal temperatures lead either to incomplete polymer degradation or to excessive gas formation. The advantages of pyrolysis in the processing of contaminated and expanded polystyrene materials were highlighted. Additionally, the importance of improving the efficiency of polymer waste processing technologies in the context of increasing environmental pressure is emphasized. It is concluded that the technology has significant potential for the production of chemical feedstocks and the development of a circular economy, provided that systems for sorting, purifying, and subsequent fractionation of pyrolysis products are improved.

Keywords: *recycling; pyrolysis; polystyrene; process temperature; residence time.*

To cite this article:

Kizatov YM, Dyussova RM, Kopishev EY, Kaliyev OY. Analysis of the Influence of Process Parameters on the Formation of Liquid Products During the Pyrolysis of Polystyrene Waste. *Kazakhstan journal for oil & gas industry.* 2026;8(2):105–118. DOI: [10.54859/kjogi108982](https://doi.org/10.54859/kjogi108982).

ӨОЖ 628.4: 678.746.22: 66.092-977: 665.71

ГТАХР 61.61.91

DOI: [10.54859/kjogi108982](https://doi.org/10.54859/kjogi108982)

Қабылданды: 06.05.2026.

Мақұлданды: 22.05.2026.

Жарияланды: 30.06.2026.

Ғылыми шолу

Полистирол қалдықтарын пиролиздеу кезінде сұйық өнімдердің пайда болуына технологиялық параметрлердің әсерін талдау

Е.М. Кизатов, Р.М. Дюсова, Э.Е. Копишев, О.Е. Қалиев

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қаласы, Қазақстан

АНДАТПА

Бұл мақалада полистирол қалдықтарын термиялық қайта өңдеу дәстүрлі механикалық жоюға тиімді балама ретінде қарастырылады. Пластикалық қалдықтардың көлемінің артуы және көбікті материалдарды қайта өңдеудің күрделілігі ескеріле отырып, сұйық пиролиз өнімдерінің шығымдылығы мен құрамына процесс параметрлерінің әсері туралы ағымдағы басылымдарға талдау жүргізілді. Реакция аймағындағы температура мен процесс ұзақтығының әсеріне ерекше назар аударылды. Талдау негізінде ең оңтайлы температура диапазоны 400–500°С екені анықталды. Бұл жағдайлар бағалы хош иісті қосылыстармен: стирол, бензол, толуол және этилбензолмен байытылған сұйық фракцияның максималды шығымдылығын қамтамасыз етеді. Оңтайлы температурадан ауытқу полимердің толық емес ыдырауына немесе газдың шамадан тыс түзілуіне әкелетіні анықталды. Ластанған және көбікті полистирол материалдарын қайта өңдеудегі пиролиздің артықшылықтары атап өтіледі. Қоршаған орта қысымының артуы жағдайында полимер қалдықтарын қайта өңдеу технологияларының тиімділігін арттырудың маңыздылығы қосымша атап өтіледі. Пиролиз өнімдерін сұрыптау, тазалау және кейіннен фракциялау жүйелері жетілдірілген жағдайда, химиялық шикізатты алу және тұйық циклді экономиканы дамыту технологиясының жоғары әлеуеті туралы қорытынды жасалды.

Негізгі сөздер: қайта өңдеу, пиролиз, полистирол, процесс температурасы, процесс ұзақтығы.

Дәйексөз келтіру үшін:

Кизатов Е.М., Дюсова Р.М., Копишев Э.Е., Қалиев О.Е. Полистирол қалдықтарын пиролиздеу кезінде сұйық өнімдердің пайда болуына технологиялық параметрлердің әсерін талдау // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2026. 8 том, №2. 105–118 б. DOI: [10.54859/kjogi108982](https://doi.org/10.54859/kjogi108982).

Введение

Разработка эффективных методов утилизации пластиковых отходов до сих пор является одной из наиболее значимых экологических и технологических задач мировой промышленности. Согласно отчету Plastic Overshoot Day 2025 [1], в мире в 2025 г. достигло отметки порядка 225 млн т пластиковых отходов в связи использованием одноразовой упаковки, бытовых изделий и текстиля. В среднем это соответствует 28,6 кг отходов на одного человека в год. При этом около 72 млн т, или 31,9%, могут быть неправильно утилизированы, т.е. попасть на неконтролируемые свалки, в окружающую среду или быть сожжены вне современных систем очистки выбросов. Эти показатели демонстрируют разрыв между объемом образования пластиковых отходов и мировой системой сбора, сортировки и переработки.

По данным Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, ежегодно в стране образуется более 4,5 млн т твердых бытовых отходов (далее – ТБО), из которых переработано и утилизировано около 28,6% [2]. За этот год в стране функционировало 2755 полигонов ТБО, из которых 19,6% соответствовали экологическим и санитарным нормам [3]. Представленная статистика подтверждает, что при сохранении текущих темпов ресайклинга часть ТБО выводится из ресурсного оборота и депонируется на полигонах. Особую актуальность приобретает поиск эффективных решений для переработки проблемных полистирольных отходов.

Полистирол и вспененный полистирол широко применяются при производстве одноразовой посуды, пищевых контейнеров, упаковочных материалов, теплоизоляционных плит и защитной транспортной упаковки. Значительная часть таких изделий относится к продукции кратковременного использования, поэтому после эксплуатации переходит в поток ТБО. Механическая переработка вспененного и обычного полистирола осложняется его низкой плотностью, загрязненностью, большим объемом при малой массе и сравнительно низкой экономической привлекательностью сбора.

Возрастает значений технологий, позволяющих получить ценные продукты. Одним из перспективных методов переработки полистирольных отходов является пиролиз – термическое разложение полимера в бескислородной среде. Пиролиз направлен на получение жидкой, газообразной и твердой фракций. Жидкие продукты пиролиза полистирола очень важны, т.к. содержат значительное количество ароматических соединений, включая стирол, этилбензол, толуол и *o*-метилстирол.

Эффективность пиролиза полистирола определяется температурой и продолжитель-

ностью процесса. Недостаточная температура может приводить к неполному разложению полимера, а чрезмерно высокая температура – к вторичному крекингу и увеличению доли газообразных продуктов. Изучения влияния термических параметров и продолжительности процесса на формирование жидкой фракции имеет важное значение для разработки эффективных технологий переработки полистирольных отходов.

Целью данной обзорной статьи является систематизация современных научных данных о влиянии температуры, продолжительности процесса и связанных технологических факторов на формирование жидких продуктов при пиролизе полистирольных отходов. Для достижения цели рассматриваются аналитико-статистические данные по пластиковым отходам за 2025 г., основные методы переработки пластика, их преимущества и недостатки, особенности термического разложения полистирола, влияние температуры и времени процесса на выход и состав жидких продуктов.

Материалы и методы

Настоящая обзорная статья подготовлена на основе анализа научных публикаций, посвященных переработке пластиковых отходов и пиролизу полистирола. Для формирования теоретической базы исследования использовались статьи, индексируемые в международных базах данных Scopus, Web of Science, ScienceDirect и MDPI¹, опубликованные преимущественно в 2020–2026 гг., материалы профильных организаций, а также статистические данные, отражающие современное состояние обращения с полимерными отходами. Поиск и отбор источников осуществлялся по тематическим ключевым словам: пиролиз, переработка, полимеры, полистирол, вспененный полистирол, влияние температуры, продолжительность процесса, выход продукта, химическая переработка, сжигание, механическая переработка, газификация.

Обработка и обобщение литературных данных проводилась с применением методов сравнительного и контент-анализа. В ходе работы были сопоставлены результаты исследований, посвященных влиянию температурных параметров, времени выдержки, скорости нагрева, времени пребывания паровой фазы, а также характеристик сырья на выход и состав жидких продуктов пиролиза полистирола. Дополнительно учитывались особенности используемых реакторов и режимов проведения процесса. Полученные результаты были систематизированы для выявления общих закономерностей формирования жидкой фракции, определения оптимальных условий проведения пиролиза и оценки перспектив практического использования продуктов термической переработки полистирольных отходов.

¹ MDPI (англ. Multidisciplinary Digital Publishing Institute – Многопрофильный институт цифровых публикаций) – издатель научных журналов открытого доступа.

Статистические данные

В 2025 г. потребление пластмасс было значительным из-за высокого спроса на упаковочные материалы, одноразовые изделия, синтетический текстиль, строительные полимеры, медицинские материалы и бытовые товары. По оценке Plastic Overshoot Day 2025 [1], наибольший вклад в образование пластиковых отходов вносит упаковка – около 33%, текстиль – около 17%, а также бытовые и одноразовые изделия – около 5%. С 2024 по 2025 г. число пластиковых увеличилось на 5 млн т, что указывает на продолжающийся рост образования при развитии отдельных программ переработки и экологического регулирования.

Основная экологическая нагрузка связана с характером их использования. Упаковочные и одноразовые полимерные изделия являются проблемной группой с точки зрения устойчивого обращения с отходами. Полистирол относится к проблемной группе, а переработка вспененно-

го полистирола является сложной из-за низкой плотности и большого объёма, что повышает стоимость логистики и сортировки, снижая экономическую привлекательность механической переработки.

Как показано в табл. 1, основной источник пластиковых отходов – сектор краткосрочного потребления. Поэтому данную категорию отходов следует рассматривать как важный объект для развития альтернативных методов переработки, включая пиролиз.

В Казахстане на 2025 г. ситуация оставалась сложной. По данным Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, около двух третей ТБО все ещё не подвергались утилизации, что начало создавать большую нагрузку на полигоны и окружающую среду. Значительная часть объектов размещения отходов требует модернизации, рекультивации или замены современными инфраструктурными объектами в сфере обращения с отходами.

Таблица 1. Показатели пластиковых отходов за 2025 г. в мире [1]
Table 1. Indicators of Plastic Waste in the World for 2025 [1]

Показатель Indicator	Значение Value	Комментарий Comment
Образование пластиковых отходов в мире, млн т Global plastic waste generation, million tons	около 225 about 225	Одноразовая упаковка, бытовые изделия и текстиль Single-use packaging, household products, and textiles
Образование пластиковых отходов на душу населения, кг/чел в год Plastic waste generation per capita, kg/person/year	28,6	Среднемировая оценка Global average estimate
Неправильно управляемые пластиковые отходы, млн т Mismanaged plastic waste, million tons	около 72 about 72	Отходы, которые могут попасть в окружающую среду Waste that may enter the environment
Доля неправильно управляемых отходов, % Share of mismanaged waste, %	31,9	Почти треть от общего объёма Nearly one-third of the total volume
Доля упаковки в образовании пластиковых отходов, % Share of packaging in plastic waste generation, %	около 33 about 33	Крупнейший источник
Доля текстиля, % Share of textiles, %	около 17 about 17	Второй значимый источник The second most significant source
Доля бытовых и одноразовых изделий, % Share of household and single-use products, %	около 5 about 5	Включает часть продукции краткосрочного использования Includes some short-life products

Таблица 2. Показатели обращения с твёрдыми бытовыми отходами в Казахстане за 2025 г.
Table 2. Indicators of Municipal Solid Waste Management in Kazakhstan for 2025

Показатель Indicator	Значение Value	Комментарий Comment
Образование ТБО в Казахстане, млн т Municipal solid waste (MSW) generation in Kazakhstan, million tons	более 4,5 more than 4.5	Общий объём ТБО Total MSW volume
Доля переработки и утилизации ТБО, % Share of MSW recycling and recovery, %	28,6%	Средний показатель по стране National average indicator
Количество полигонов, ед. Number of landfills, units	2755	По итогам 2025 г. As of the end of 2025
Полигоны, соответствующие экологическим и санитарным нормам, ед. Landfills compliant with environmental and sanitary standards, units	540	19,6% от общего числа 19.6% of the total number
Несанкционированные свалки, выявленные космическим мониторингом, ед. Illegal dumpsites identified through satellite monitoring, units	3827	3а 2025 г. During 2025
Ликвидированные несанкционированные свалки, ед. Eliminated illegal dumpsites, units	3464	91% от выявленных 91% of identified sites
Населённые пункты с внедрённым раздельным сбором ТБО, ед. Settlements with implemented separate MSW collection, units	123	Из 211 городов и районов Out of 211 cities and districts

Проблемы утилизации пластиковых отходов

Основные проблемы утилизации пластиковых отходов разделяются на четыре группы: экологические, технологические, экономические и организационные. К экологическим относится попадание пластиковых отходов в окружающую среду, что вызывает загрязнение почв, рек, озёр, морей и океанов. Со временем они преобразовываются в микропластик, который попадает в пищевые цепи и накапливается в живых организмах [4].

В исследовании [5] упоминается, что технологические проблемы связаны с невозможностью одинаково производить механическую переработку всех видов пластика. Наиболее эффективно перерабатываются чистые и отсортированные потоки полиэтилентерефталата, полиэтилена низкого давления и полипропилена. Смешанные, загрязнённые, многослойные, окрашенные и вспененные материалы перерабатываются проблематично. Полистирол, особенно вспененный, относится к их числу.

Переработка отдельных пластиковых фракций в частных случаях нерентабельна, что является экономической проблемой. По данным исследования [6], для вспененного полистирола

транспортировка без прессования экономически невыгодна, поскольку он занимает большой объём при малой массе. Организационные барьеры в управлении пластиковыми отходами обусловлены фрагментарностью цепочки создания стоимости. Как показывает исследование [6], отсутствие информационной связности между производителями упаковки и операторами переработки, а также институциональная слабость механизмов расширенной ответственности производителей препятствуют созданию замкнутых циклов, несмотря на наличие теоретически возможных технологических решений.

Преодоление экологического кризиса, вызванного накоплением пластика, требует перехода к системной оптимизации всей цепочки обращения с отходами. Учитывая наличие физико-химических ограничений при механической переработке и высокую стоимость логистики легковесных отходов, пиролиз является оптимальной альтернативой для утилизации данных материалов. Пиролиз позволяет получать ценное сырьё – мономер или пиролизное масло, что организационно и экономически более оправдано для переработки некондиционных фракций в рамках экономики замкнутого цикла.

Таблица 3. Сравнительная характеристика основных методов переработки пластиковых отходов
Table 3. Comparative Characteristics of the Main Plastic Waste Recycling Methods

Метод Method	Сущность процесса Process Description	Основные продукты Main products	Преимущества Advantages	Ограничения Limitations
Механическая переработка Mechanical recycling	Сортировка, мойка, измельчение, плавление и гранулирование Sorting, washing, shredding, melting, and pelletizing	Вторичные гранулы изделия из переработанного пластика Recycled pellets, products made from recycled plastic	Простота, сравнительно низкая стоимость, сохранение материала Simplicity, relatively low cost, preservation of material	Требует чистого и однородного сырья. Механические и эксплуатационные свойства ухудшаются при повторной переработке Requires clean and homogeneous feedstock. Mechanical and performance properties deteriorate after repeated recycling
Химическая переработка Chemical recycling	Разрушение полимерных цепей до мономеров или химических продуктов Breakdown of polymer chains into monomers or chemical products	Мономеры, олигомеры, химическое сырьё Monomers, oligomers, chemical feedstock	Позволяет получать более качественное сырьё, подходит для некоторых сложных отходов Enables production of higher-quality raw materials, suitable for some complex waste streams	Высокая стоимость, сложность оборудования, необходимость контроля примесей High cost, equipment complexity, need for impurity control
Сжигание с энергетической утилизацией Incineration with energy recovery	Полное окисление отходов с выделением тепла Complete oxidation of waste with heat generation	Тепло, электроэнергия, зола, дымовые газы Heat, electricity, ash, flue gases	Быстро уменьшает объём отходов, позволяет получать энергию Rapidly reduces waste volume and allows energy production	Потеря химической ценности полимера, риск выбросов Loss of the polymer's chemical value, risk of emissions
Газификация Gasification	Высокотемпературное превращение в ограниченной окислительной среде High-temperature conversion in a limited oxidizing environment	Синтез-газ, твёрдый остаток, смолы Syngas, solid residue, tars	Получение газообразного сырья для энергии и химического синтеза Production of gaseous feedstock for energy and chemical synthesis	Высокая температура, сложная очистка газа, требование к сырью High temperatures, complex gas cleaning, feedstock requirements
Пиролиз Pyrolysis	Термическое разложение без доступа кислорода Thermal decomposition in the absence of oxygen	Жидкая фракция, газ, твёрдый остаток Liquid fraction, gas, solid residue	Получение жидких УВ, подходит для трудно перерабатываемых фракций Production of liquid hydrocarbons, suitable for hard-to-recycle fractions	Энергоёмкость, необходимость контроля температуры и времени High energy consumption, need for temperature and residence time control

Основные методы переработки пластика

Современная система утилизации и переработки пластиковых отходов включает: механическую, химическую, сжигание с получением энергии, газификацию и пиролиз. Выбор метода зависит от химической природы полимера, сте-

пени загрязнения отходов, состава пластиковой смеси, экономической целесообразности и доступности технологической инфраструктуры. Ни один метод переработки отходов не является универсальным, поэтому необходимо рассматривать с учётом состава отхода и конечной цели переработки [7–12].

Таблица 4. Сравнительная оценка методов переработки полистирольных отходов
Table 4. Comparative Assessment of Polystyrene Waste Recycling Methods

Критерий сравнения Comparison criterion	Механическая переработка Mechanical recycling	Химическая переработка Chemical recycling	Сжигание Incineration	Газификация Gasification	Пиролиз Pyrolysis
Сохранение материальной ценности Material value retention	Высокое, если сырьё чистое High, if feedstock is clean	Среднее / высокое Medium / high	Отсутствует None	Частичное, через синтез-газ Partial, via syngas	Высокое, через жидкие продукты High, via liquid products
Пригодность для загрязнённых отходов Suitability for contaminated waste	Низкая Low	Средняя Medium	Высокая High	Средняя Medium	Средняя или высокая Medium to high
Пригодность для вспененного полистирола Suitability for expanded polystyrene	Ограниченная Limited	Перспективная Promising	Возможна, но нежелательна Possible, but undesirable	Возможна Possible	Наиболее перспективная Most promising
Основной продукт Main product	Вторичная гранула Secondary pellets	Мономеры, химические продукты Monomers, chemical products	Тепло, электроэнергия Heat, electricity	Синтез-газ Syngas	Жидкая фракция, газ Liquid fraction, gas
Возможность получения стирола Possibility of styrene recovery	Низкая Low	Высокая для деполимеризации полистирола High for polystyrene depolymerization	Нет None	Нет None	Высокая при оптимальных условиях High under optimal conditions
Основные ограничения Main limitations	Требуется чистое сырьё Requires clean feedstock	Сложность и стоимость процесса Process complexity and high cost	Выбросы и потеря химической ценности Emissions and loss of chemical value	Высокая температура и очистка газа High temperature and gas cleaning requirements	Требуется оптимизация температуры и времени Requires optimization of temperature and residence time
Общая оценка Overall assessment	Подходит ограниченно Limited applicability	Перспективная Promising	Использовать только для остаточных фракций Suitable only for residual fractions	Менее целесообразно для жидких продуктов Less suitable for liquid product recovery	Наиболее обоснованный метод для получения жидкой фракции Most justified method for producing liquid fractions

Основные методы переработки пластика

Современная система утилизации и переработки пластиковых отходов включает: механическую, химическую, сжигание с получением энергии, газификацию и пиролиз. Выбор метода зависит от химической природы полимера, степени загрязнения отходов, состава пластиковой смеси, экономической целесообразности и доступности технологической инфраструктуры. Ни один метод переработки отходов не является универсальным, поэтому необходимо рассматривать с учётом состава отхода и конечной цели переработки [7–12].

Механическая переработка основана на физическом преобразовании полимеров без разрушения их химической структуры и включает стадии сортировки, мойки, измельчения и грануляции [8]. Преимущества метода – технологи-

ческая простота и низкая стоимость, что делает его оптимальным для термопластичных полимеров, таких как полиэтилентерефталат, полиэтилен и полипропилен. Вспененный полистирол и полистирол, загрязнённый пищевыми отходами, требуют подготовки.

Химическая переработка представляет собой процесс деполимеризации – разрушение макромолекул полимеров до мономеров, которые могут быть использованы в качестве вторичного нефтехимического сырья. Данный метод переработки эффективен для переработки загрязнённых и многослойных полимерных отходов [9]. Ключевым преимуществом данного метода является получение продуктов, по своим характеристикам близких к первичному сырью. Однако существенным недостатком химической переработки выступает необходимость использования сложного технологического оборудова-

ния и дорогостоящих каталитических систем [13]. Химическая переработка критически важна для реализации замкнутого цикла, дополняя механический метод переработки.

Сжигание – термический метод утилизации полимерных отходов, при котором происходит их полное окисление с выделением тепловой энергии. Этот подход актуален для полимерных отходов, непригодных для механической или химической переработки. Экологическая безопасность процесса критически зависит от систем очистки отходящих газов. В современной системе обращения с отходами сжигание рассматривается преимущественно как метод переработки остаточных фракций [8]. В случае пиролиза полистирола это – способ получения ароматических соединений, которые иначе были бы выброшены в атмосферу при сжигании в качестве углекислого газа и воды [14].

Газификация – термохимический процесс преобразования пластиковых отходов в синтез-газ при высоких температурах в условиях ограниченного доступа окислителя. По данным исследований [15], метод позволяет получать универсальное сырьё для синтеза водорода, метанола и жидких топлив, обеспечивая переход от простой энергетической утилизации к химическому рециклингу. Технология эффективна для переработки сложных смешанных потоков, однако её реализация требует высокотехнологичного оборудования и многостадийной очистки газа от смол и коррозионно-активных соединений. Применительно к полистиролу газификация признается менее раци-

ональной, чем пиролиз, т.к. глубокое разложение материала до газовой фазы лишает процесс его главного преимущества – возможности получения ценных жидких ароматических фракций.

Пиролиз – это термическое разложение полимеров в бескислородной среде, в результате которого образуются жидкая, газообразная и твёрдая фракции. Согласно современным исследованиям, процесс обычно проводят при температурах 455–700°C, при этом выход продуктов напрямую зависит от состава сырья, времени пребывания паров и типа реактора [10]. Главная ценность метода заключается в получении жидких углеводородов (далее – УВ), которые могут служить альтернативным топливом или сырьём для нефтехимии. В табл. 3 представлена сравнительная характеристика различных методов переработки.

Каждый метод имеет свою область применения. В табл. 4 представлена сравнительная оценка методов переработки полистирольных отходов.

Пиролиз как метод переработки полимерных отходов

Пиролиз – термохимический метод переработки пластиковых отходов, основанный на разложении полимеров при повышенной температуре в бескислородной среде. При разрушении макромолекулярных цепей образуются жидкие, газообразные и твёрдые продукты. Пиролиз позволяет превращать пластиковые отходы в продукты с добавленной стоимостью, вклю-

Таблица 5. Особенности пиролиза основных видов пластиковых отходов
Table 5. Characteristics of Pyrolysis of Major Plastic Waste Types

Вид пластика Plastic Type	Основные особенности пиролиза Main pyrolysis characteristics	Преобладающие продукты Predominant products	Основные ограничения Main limitations
Полиэтилен Polyethylene (PE)	Разложение длинных углеводородных цепей Decomposition of long hydrocarbon chains	Алканы, алкены, воски, жидкие УВ Alkanes, alkenes, waxes, liquid hydrocarbons	Широкий состав продуктов, необходимость дополнительного крекинга Wide product distribution; requires additional cracking/upgrading
Полипропилен Polypropylene (PP)	Термическое расщепление разветвленных цепей Thermal scission of branched polymer chains	Алканы, алкены, жидкая и газовая фракции Alkanes, alkenes, liquid and gaseous fractions	Сложный состав масла, зависимость от температуры и катализатора Complex oil composition; strong dependence on temperature and catalyst
Полиэтилен-терефталат Polyethylene terephthalate (PET)	Разложение кислородсодержащего полиэфира Decomposition of oxygen-containing polyester	Кислородсодержащие и ароматические соединения Oxygenated compounds and aromatic compounds	Кислотные продукты, ухудшение качества жидкой фракции Formation of acidic products; deterioration of liquid fraction quality
Поливинилхлорид Polyvinyl chloride (PVC)	Дехлорирование с выделением HCl Dehydrochlorination with HCl release	Хлороводород, УВ, хлорорганические соединения Hydrogen chloride, hydrocarbons, chlorinated organic compounds	Коррозия оборудования, токсичные продукты, необходимость удаления поливинилхлорида Equipment corrosion, toxic emissions; requires PVC removal/pre-treatment
Полиуретан Polyurethane (PU)	Разложение уретановых групп Breakdown of urethane groups	Азотсодержащие соединения, газы, жидкая фракция Nitrogen-containing compounds, gases, liquid fraction	Токсичные продукты, сложная очистка газов Toxic products; complex gas purification required
Полистирол Polystyrene (PS)	Деполимеризация стирольных звеньев Depolymerization of styrene units	Стирол, этилбензол, толуол, α-метилстирол, димеры Styrene, ethylbenzene, toluene, α-methylstyrene, dimers	Необходим контроль температуры и времени для снижения вторичного крекинга Requires strict control of temperature and residence time to reduce secondary cracking

чая топливо, химическое сырьё и компоненты для дальнейшей нефтехимической переработки [10, 16, 17].

Жидкая фракция – смесь УВ различного состава, используется как альтернативное топливо или как сырьё для дальнейшей переработки. Газовая фракция: водород, метан, этан, этилен, пропан, пропилен, бутаны, бutenы, оксид и диоксид углерода; используется для частичного энергетического обеспечения самого процесса. Твёрдый остаток, или кокс, содержит углеродистые вещества, минеральные примеси, наполнители и неорганические добавки.

Согласно данным табл. 5, пиролиз эффективен для пластиков благодаря их углеводородной природе и высокому теплотворному потенциалу, который превышает показатели биомассы из-за низкого содержания кислорода. В обзоре [17] указывается, что выход жидкой фракции обычно составляет 60–80%, а в условиях быстрого пиролиза (450–600°C) может достигать 85%. Эффективность процесса напрямую зависит от состава сырья: полиолефины и полистирол признаны наиболее благоприятными материалами, при этом полистирол обладает уникальным преимуществом, позволяя извлекать не только топливные компоненты, но и химически ценные ароматические соединения.

Эффективность и особенности пиролиза полистирола

В отличие от других видов пластика, полистирол содержит в своем звене (-CH₂ - CH(C₆H₅)-)_n фенильную группу, способствующую при термическом воздействии

селективному разрыву связей в основной цепи, что позволяет с высокой эффективностью восстанавливать мономерный стирол и ряд сопутствующих ароматических соединений. Благодаря этому полистирол обеспечивает получение жидкой фракции с высокой топливной и химической ценностью при минимальном содержании кислорода в продуктах [18, 19].

Механизм превращений при пиролизе включает в себя цепочку последовательных реакций: разрыв цепи, образование активных радикалов, внутримолекулярные перегруппировки и вторичный крекинг. На начальной стадии нагрева происходит ослабление связей, что приводит к формированию реакционноспособных радикалов, которые при оптимальных технологических условиях превращаются в стирол. При неоптимальных условиях начинаются вторичные процессы: образование газообразных УВ и твёрдого углеродистого остатка, что снижает выход целевой жидкой фазы и загрязняет оборудование [18, 20].

Для оценки эффективности процесса и качества получаемых продуктов используется классификация основных фракций, приведенная в табл. 6.

Основным целевым компонентом является стирол, но в процессе также формируются толуол, этилбензол, ксилолы, бензол и более тяжёлые олигомеры, такие как димеры и тримеры стирола [20, 21]. Их физико-химические свойства – плотность и вязкость – заметно выше, чем у масел, получаемых из полиолефинов. В табл. 7 представлены данные по компонентам жидкой фракции пиролиза полистирола.

Таблица 6. Фракции и основные продукты пиролиза полистирольных отходов
Table 6. Fractions and Main Products of Polystyrene Waste Pyrolysis

Фракция Fraction	Основные компоненты Main components	Значение Significance	Особенности Characteristics
Жидкая Liquid	Стирол, этилбензол, толуол, бензол, димеры Styrene, ethylbenzene, toluene, benzene, dimers	Сырьё для нефтехимии Feedstock for petrochemical industry	Требует тщательной очистки Requires thorough purification
Газовая Gas	H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆	Энергетический ресурс Energy resource	Снижает выход жидкости Reduces liquid yield
Твёрдая Solid	Кокс, углеродистые примеси Coke, carbonaceous impurities	Ограниченное применение Limited applicability	Ухудшает работу реактора Negatively affects reactor operation

Таблица 7. Основные компоненты жидкой фракции пиролиза полистирола
Table 7. Main Components of the Liquid Fraction of Polystyrene Pyrolysis

Компонент Fraction	Путь образования Main components	Значение Significance	Особенности Characteristics
Стирол Styrene	Деполимеризация Depolymerization	Возврат в производство Reuse in production cycle	Реакционноспособен Highly reactive compound
Толуол Toluene	Вторичные реакции Secondary reactions	Растворитель Solvent	Растет при глубоком крекинге Increases under deep cracking conditions
Этилбензол Ethylbenzene	Перенос водорода Hydrogen transfer reactions	Химическое сырьё Chemical feedstock	Сложность разделения со стиролом Difficult to separate from styrene
Бензол Benzene	Глубокое расщепление Deep cracking reactions	Химическое сырьё Chemical feedstock	Токсичность Toxic compound
Димеры / тримеры Dimers / trimers	Рекомбинация радикалов Radical recombination	Тяжелая фракция Heavy fraction	Повышают вязкость масла Increases oil viscosity

Экономическая эффективность пиролиза полистирола зависит от разделения сложных продуктов на фракции коммерческой чистоты. Современные исследования в области переработки продуктов пиролиза подтверждают, что фрак-

ционная перегонка является обязательным и определяющим этапом, позволяющим трансформировать смесь отходов в ценные химические компоненты, пригодные для повторного использования в промышленном производстве [22].

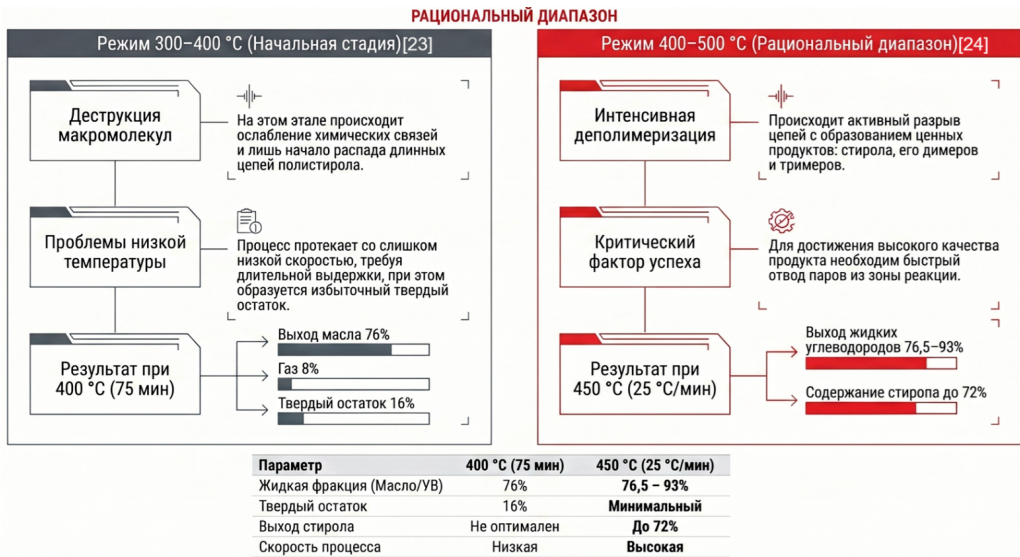


Рисунок 1. Влияние температуры на пиролиз полистирольных отходов по отдельным источникам
Figure 1. Effect of Temperature on the Pyrolysis of Polystyrene Waste According to Different Sources

Таблица 8. Влияние временных параметров на пиролиз полистирольных отходов
Table 8. Influence of Time Parameters on the Pyrolysis of Polystyrene Waste

Параметр Parameter	Характеристика параметра Parameter characteristics	Влияние на процесс Effect on the process	Возможный риск при недостаточном значении Risk of insufficient value	Возможный риск при чрезмерном значении Risk of excessive value
Время выдержки твёрдой фазы Solid-phase residence time	Время нахождения полимера в зоне нагрева Time the polymer remains in the heating zone	Определяет полноту разложения сырья Determines the completeness of polymer decomposition	Неполное разложение полистирола, увеличение остатка Incomplete polystyrene decomposition, increased residue formation	Вторичные реакции, рост газа и кокса Secondary reactions, increased gas and coke formation
Время пребывания паров Vapour residence time	Время нахождения летучих продуктов в горячей зоне Time volatile products remain in the hot zone	Определяет сохранность стирола и первичных продуктов Determines preservation of styrene and primary products	Недостаточная конверсия тяжёлых фрагментов Insufficient conversion of heavy fragments	Крекинг стирола, рост газовой фракции Styrene cracking, increased gas fraction
Скорость нагрева Heating rate	Скорость достижения заданной температуры Rate of reaching the target temperature	Влияет на механизм деполимеризации и образование паров Influences depolymerization mechanism and vapour formation	Длительное пребывание в промежуточной зоне, неполный пиролиз Prolonged residence in intermediate temperature zone, incomplete pyrolysis	Слишком интенсивное выделение паров при слабой конденсации Excessively rapid vapour release with poor condensation efficiency
Время конденсации Condensation time	Эффективность охлаждения и сбора паров Efficiency of vapour cooling and collection	Влияет на выход жидкой фракции Affects liquid fraction yield	Потери летучих продуктов Loss of volatile products	Возможное загрязнение и смешение фракций Contamination and mixing of fractions
Общее время реакции Total reaction time	Полная продолжительность пиролиза Overall duration of pyrolysis process	Характеризует технологический режим в целом Characterizes overall process regime	Низкая степень превращения Low conversion degree	Увеличение побочных продуктов и энергозатрат Increased by-products and energy consumption

Влияние технологических параметров

Эффективность пиролиза полистирола и его вспененной формы определяется совокупным влиянием температуры и продолжительности процесса. Рис. 1 демонстрирует влияние температуры процесса на глубину разложения макромолекул и направление вторичных реакций. Продолжительность процесса влияет на полноту превращения сырья и степень последующего крекинга образовавшихся паров.

Выбор конкретного режима процесса определяется тем, какой результат необходимо: получение максимального количества жидкой фракции или достижение высокой чистоты стирола. Температуры выше 500°C неэффективны, поскольку приводят к усиленному газообразованию и накоплению тяжёлых полициклических ароматических УВ. Продукты высокого качества образуются в диапазоне 400–450°C. Для вспененного полистирола важна скорость подвода тепла, тогда как для полистирольных отходов важно время нахождения сырья в реакторе. Следовательно, оптимальные условия пиролиза должны подбираться с учётом структуры сырья и особенностей используемого оборудования.

Продолжительность процесса определяет количественный выход и компонентный состав жидких продуктов пиролиза полистирольных отходов. Температура обуславливает интенсивность деструкции полимерных цепей. Время реакции лимитирует полноту разложения сырья. Данный параметр регулирует степень вторичных превращений образующихся соединений.

Анализ процесса требует дифференциации временных характеристик. К ним относятся общая продолжительность реакции и время выдержки твёрдой фазы. Отдельно учитываются время пребывания паров в высокотемпературной зоне и длительность конденсации продуктов.

Сочетание температуры и времени в табл. 8 обеспечивает исчерпывающую деструкцию полистирольного сырья. Указанные режимы максимизируют генерацию жидкой фракции. Минимизируются потери первичных ароматических продуктов. Эффективность процесса зависит от общей продолжительности и времени пребывания паров. Учитывается градиент скорости нагрева. Технологическую значимость имеет интенсивность последующей конденсации.

Заключение

Проведённый обзор показывает, что проблема переработки полистирольных отходов остаётся актуальной в связи с ростом объёмов пластиковых отходов, ограничениями механической переработки и высокой долей изделий кратковременного использования. Полистирол широко применяется в упаковке, одноразовой посуде, теплоизоляционных материалах и вспененных защитных изделиях, поэтому значитель-

ная часть таких материалов быстро переходит в поток отходов. Особенно проблемным является вспененный полистирол, который имеет низкую плотность, занимает большой объём при транспортировке и требует предварительного уплотнения перед переработкой.

Сравнение основных методов переработки пластика показало, что механическая переработка эффективна только для чистых и однородных потоков полимеров. Для загрязнённых, смешанных и вспененных отходов её применение ограничено. Сжигание позволяет уменьшить объём отходов и получить энергию, однако приводит к полной потере химической ценности полимера и требует строгого контроля выбросов. Газификация обеспечивает получение синтез-газа, но не ориентирована на получение жидких ароматических продуктов. На этом фоне пиролиз является наиболее перспективным методом переработки полистирольных отходов, который позволяет получить жидкую фракцию, содержащую ценные ароматические соединения.

Особенность пиролиза полистирола заключается в склонности данного полимера к деполимеризации с образованием стирола. Благодаря строению макромолекулы полистирола жидкие продукты его пиролиза отличаются высоким содержанием ароматических соединений: стирола, толуола, этилбензола, бензола, димеров и тримеров стирола. Пиролиз полистирола и вспененного полистирола представляет собой метод химического рециклинга. Процесс обеспечивает возврат стирольного мономера в промышленный оборот.

Температура определяет выход и компонентный состав жидких продуктов. Оптимальный диапазон деструкции составляет 400–500°C. Снижение температуры ниже указанного уровня вызывает неполное разложение полимера. Это сокращает выход жидкой фракции. Превышение температурного максимума инициирует вторичные реакции. Происходит крекинг стирола. Растёт генерация газообразных продуктов и тяжёлых ароматических соединений.

Продолжительность процесса влияет на эффективность превращения сырья. Недостаточная экспозиция ведёт к неполной деструкции полистирола. Чрезмерная выдержка способствует вторичным превращениям первичных продуктов. Ключевым параметром является время пребывания паров в горячей зоне. Сохранение стирола требует быстрой эвакуации летучих компонентов из реактора. Необходима их немедленная конденсация.

Жидкие продукты пиролиза требуют дополнительной очистки, стабилизации и фракционирования. Приоритетным направлением является выделение стирола для повторного синтеза полимеров. Метод позволяет получать ароматические фракции и сырьё для нефтехимии. Использование пиролизного масла в качестве топлива

ограничено. Препятствием для использования пиролизного масла в качестве моторного топлива является сложный состав и высокое содержание стиролов, бензолов, толуолов и этилбензолов.

Технология сопряжена с рисками образования летучих органических соединений и полициклических ароматических УВ. Примеси в составе отходов инициируют синтез токсичных соединений. Требуется строгий контроль состава сырья. Необходима предварительная сортировка и очистка отходящих газов.

Рентабельность метода зависит от стабильности сырьевого потока и логистических затрат. Внедрение технологии требует создания системы сбора и подготовки отходов. Целевым ориентиром является получение высокочистых химических компонентов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Данное исследование проведено в рамках программно-целевого финансирования Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант №BR24992883 «Создание научно-технологического парка нефтехимии и полимерных материалов для предоставления услуг, и внедрения прикладных результатов НИР в приоритетные сектора экономики страны»).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Благодарность. Авторы выражают благодарность канд. хим. наук, профессору Сейтеновой Г.Ж. за содействие в подготовке научной статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Кизатов Е.М. – сбор и обработка данных, формирование, написание текста; Дюсова Р.М. – проведение исследования; Копишев Э.Е. – организация исследования; Калиев О.Е. – подготовка визуальных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Perreard S., Boucher J., Gallato M. Plastic Overshoot Day – Report 2025. EA-Earth Action; 2025.
2. kaz-waste.kz [интернет]. Казахстанская ассоциация по управлению отходами «KazWaste». Министерство экологии подвело итоги: результаты в сфере управления отходами [дата обращения 13.03.2026]. Доступ по ссылке: kaz-waste.kz/news/936/.
3. caclimate.fund [интернет]. CACF. Более 30% отходов утилизировано и 95% стихийных свалок ликвидировано в Казахстане в 2025 году [дата обращения 13.03.2026]. Доступ по ссылке: caclimate.fund/novosti/bolee-30-othodov-utilizirovano-i-95-stihijnyh-svalok-likvidirovano-v-kazhastane-v-2025-godu.
4. Lee Y., Cho J., Sohn J., Kim C. Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea // *Yonsei Med J.* 2023. Vol. 64(5). P. 301–308. doi: [10.3349/ymj.2023.0048](https://doi.org/10.3349/ymj.2023.0048).
5. Schyns Z.O.G., Shaver M.P. Mechanical recycling of packaging plastics: a review // *Macromolecular Rapid Communications.* 2021. Vol. 42, Issue. 3. doi: [10.1002/marc.202000415](https://doi.org/10.1002/marc.202000415).

Необходим переход от лабораторных моделей к промышленным технологическим схемам. Масштабирование реакторов требует углубленного изучения кинетики разложения. Актуальны исследования на реальных смешанных отходах. Основной задачей является интеграция пиролиза в систему экономики замкнутого цикла (циркулярная экономика). Целью становится создание замкнутого цикла производства полистирола.

Пиролиз полистирольных отходов является инструментом снижения антропогенной нагрузки. Оптимизация технологических параметров позволяет трансформировать отходы в ценное химическое сырьё. Метод составляет фундамент системы устойчивого управления полимерными отходами.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was carried out within the framework of program-targeted funding by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992883 “Establishment of a Scientific and Technological Park for Petrochemistry and Polymer Materials to Provide Services and Implement Applied Research Results in Priority Sectors of the National Economy”).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Acknowledgment. The authors express their gratitude to Candidate of Chemical Sciences, Professor G.Zh. Seitenoვა for her assistance in the preparation of the scientific article.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Yessmagambet M. Kizatov – data collection and processing, manuscript drafting and writing; Rizagul M. Dyussova – conducting the study; Eldar Ye. Kopishev – research organization; Olzhas Ye. Kaliyev – preparation of visual materials.

6. Kulakovskaya A., Wiprächtiger M., Knoeri C., Bening C.R. Integrated environmental-economic circular economy assessment: Application to the case of expanded polystyrene // *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 197. doi: [10.1016/j.resconrec.2023.107069](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107069).
7. Yelemessova Z., Kopishev E., Dyussova R., et al. Sustainable Plastic Waste Management: Global Practices and Perspectives on the Case of Kazakhstan // *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. 2025. Vol. 8. P. 1161–1179. doi: [10.53894/ijirss.v8i1.4547](https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i1.4547)
8. Silva R.J.D.O., Graf K., Leite Ribeiro Okimoto M.L. Plastic waste recycling: an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 72. doi: [10.1186/s44147-025-00799-2](https://doi.org/10.1186/s44147-025-00799-2).
9. Achilias D.S. Thermo-chemical recycling of plastics as a sustainable approach to the plastic waste issue // *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2025. Vol. 10. P. 2605–2618. doi: [10.1007/s41207-025-00800-7](https://doi.org/10.1007/s41207-025-00800-7).
10. Yaqoob H., Ali H.M., Khalid U. Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: a review of key factors // *RSC Sustainability*. 2025. Vol. 3, Issue 1. P. 208–218. doi: [10.1039/D4SU00504J](https://doi.org/10.1039/D4SU00504J).
11. Alrazen H.A., Aminossadati S.M., Mahmood H.A., et al. A review of the pathways, limitations, and perspectives of plastic waste recycling // *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2025. Vol. 14. doi: [10.1007/s40243-025-00328-4](https://doi.org/10.1007/s40243-025-00328-4).
12. Alabi O.O., Akande T.O., Gbadeyan O.J., Deenadayalu N. Advanced technologies for plastic waste recycling: examine recent developments // *RSC Advances*. 2025. Vol. 15, Issue 48. P. 40541–40557. doi: [10.1039/D5RA06715D](https://doi.org/10.1039/D5RA06715D).
13. Lee S.W., Jeong S.J., Hidajat M.J., et al. Sustainable chemical recycling of waste polystyrene via catalytic pyrolysis // *ACS Omega*. 2025. Vol. 10, Issue 43. P. 51406–51418. doi: [10.1021/acsomega.5c06944](https://doi.org/10.1021/acsomega.5c06944).
14. Jeswani H., Krüger C., Ruz M., et al. Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 769. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.144483](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483).
15. Halba A., Thengane S.K., Arora P. A critical outlook on lignocellulosic biomass and plastics co-gasification // *Energy & Fuels*. 2022. Vol. 37, Issue 1. P. 19–35. doi: [10.1021/acs.energyfuels.2c02907](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02907).
16. 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. doi: [10.1016/j.jaap.2024.106479](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106479).
17. Hasan M.M., Haque R., Jahurul M.I., Rasul M.G. Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy recovery // *Energy Conversion and Management*. 2025. Vol. 326. doi: [10.1016/j.enconman.2025.119511](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119511).
18. Li Y., Zhang C., Wang W., et al. A study on the pyrolysis and product regulation mechanism of waste polystyrene // *Molecules*. 2025. Vol. 30, Issue 3. doi: [10.3390/molecules30030727](https://doi.org/10.3390/molecules30030727).
19. Royuela D., Veses A., Garcia T., et al. Advances in the circular economy of polystyrene // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2026. Vol. 14, Issue 2. doi: [10.1016/j.jece.2026.121633](https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121633).
20. Gonzalez-Aguilar A.M., Pérez-García V., Riesco-Ávila J.M. A thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene waste review // *Polymers*. 2023. Vol. 15, Issue 6. doi: [10.3390/polym15061582](https://doi.org/10.3390/polym15061582).
21. Park K.B., Jeong Y.S., Guzelciftci B., Kim J.S. Two-stage pyrolysis of polystyrene // *Appl Energy*. 2020. Vol. 259. doi: [10.1016/j.apenergy.2019.114240](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114240).
22. Holtkamp M., Renner M., Matthiesen K., et al. Robust downstream technologies in polystyrene waste pyrolysis // *Resources, Conservation and Recycling*. 2024. Vol. 205. doi: [10.1016/j.resconrec.2024.107558](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107558).
23. Gonzalez-Aguilar A.M., Cabrera-Madera V.P., Vera-Rozo J.R., Riesco-Ávila J.M. Effects of heating rate and temperature on the thermal pyrolysis of expanded polystyrene // *Polymers*. 2022. Vol. 14, Issue 22. doi: [10.3390/polym14224957](https://doi.org/10.3390/polym14224957).
24. Miandad R., Nizami A.S., Rehan M., et al. Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste // *Waste Manag.* 2016. Vol. 58. P. 250–259. doi: [10.1016/j.wasman.2016.09.023](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023).

REFERENCES

1. Perreard S, Boucher J, Gallato M. Plastic Overshoot Day – Report 2025. EA-Earth Action; 2025.
2. kaz-waste.kz [Internet]. KazWaste – Kazakhstan Association for Waste Management. Ministerstvo ekologii podvelo itogi: rezul'taty v sfere upravleniya otkhodami [cited 2026 March 13]. Available from: kaz-waste.kz/news/936/. (In Russ).
3. cacclimate.fund [Internet]. CACF. More than 30% of waste was recycled and 95% of illegal dumpsites were eliminated in Kazakhstan in 2025 [cited 2026 March 13]. Available from: cacclimate.fund/novosti/bolee-30-othodov-utilizirovano-i-95-stihinyh-svalok-likvidirovano-v-kazahstane-v-2025-godu.
4. Lee Y, Cho J, Sohn J, Kim C. Health Effects of Microplastic Exposures: Current Issues and Perspectives in South Korea. *Yonsei Med J*. 2023;64(5):301–308. doi: [10.3349/ymj.2023.0048](https://doi.org/10.3349/ymj.2023.0048).
5. Schyns ZOG, Shaver MP. Mechanical recycling of packaging plastics: a review. *Macromolecular Rapid Communications*. 2021;42(3):2000415. doi: [10.1002/marc.202000415](https://doi.org/10.1002/marc.202000415).
6. Kulakovskaya A, Wiprächtiger M, Knoeri C, Bening CR. Integrated environmental-economic circular economy assessment: Application to the case of expanded polystyrene. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023;197:107069. doi: [10.1016/j.resconrec.2023.107069](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107069).
7. Yelemessova Z, Kopishev E, Dyussova R, et al. Sustainable plastic waste management: global practices and perspectives on the case of Kazakhstan. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. 2025;8:1161–1179. doi: [10.53894/ijirss.v8i1.4547](https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i1.4547)
8. Silva RJDO, Graf K, Leite Ribeiro Okimoto ML. Plastic waste recycling: an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2025;72:251. doi: [10.1186/s44147-025-00799-2](https://doi.org/10.1186/s44147-025-00799-2).
9. Achilias DS. Thermo-chemical recycling of plastics as a sustainable approach to the plastic waste issue. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 2025;10:2605–2618. doi: [10.1007/s41207-025-00800-7](https://doi.org/10.1007/s41207-025-00800-7).
10. Yaqoob H, Ali HM, Khalid U. Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: a review of key factors. *RSC Sustainability*. 2025;3(1):208–218. doi: [10.1039/D4SU00504J](https://doi.org/10.1039/D4SU00504J).
11. Alrazen HA, Aminossadati SM, Mahmood HA, et al. A review of the pathways, limitations, and perspectives of plastic waste recycling. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2025;14:50. doi: [10.1007/s40243-025-00328-4](https://doi.org/10.1007/s40243-025-00328-4).
12. Alabi OO, Akande TO, Gbadeyan OJ, Deenadayalu N. Advanced technologies for plastic waste recycling: examine recent developments. *RSC Advances*. 2025;15(48):40541–40557. doi: [10.1039/D5RA06715D](https://doi.org/10.1039/D5RA06715D).
13. Lee SW, Jeong SJ, Hidajat MJ, et al. Sustainable chemical recycling of waste polystyrene via catalytic pyrolysis. *ACS Omega*. 2025;10(43):51406–51418. doi: [10.1021/acsomega.5c06944](https://doi.org/10.1021/acsomega.5c06944).

14. Jeswani H, Krüger C, Russ M, et al. Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis. *Science of the Total Environment*. 2021;769:144483. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.144483](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483).
15. Halba A, Thengane SK, Arora P. A critical outlook on lignocellulosic biomass and plastics co-gasification. *Energy & Fuels*. 2022;37(1):19–35. doi: [10.1021/acs.energyfuels.2c02907](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02907).
16. 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;179:106479. doi: [10.1016/j.jaap.2024.106479](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106479).
17. Hasan MM, Haque R, Jahirul MI, Rasul MG. Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy recovery. *Energy Conversion and Management*. 2025;326:119511. doi: [10.1016/j.enconman.2025.119511](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119511).
18. Li Y, Zhang C, Wang W, et al. A study on the pyrolysis and product regulation mechanism of waste polystyrene. *Molecules*. 2025;30(3):727. doi: [10.3390/molecules30030727](https://doi.org/10.3390/molecules30030727).
19. Royuela D, Veses A, García T, et al. Advances in the circular economy of polystyrene. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2026;14(2):121633. doi: [10.1016/j.jece.2026.121633](https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121633).
20. Gonzalez-Aguilar AM, Pérez-García V, Riesco-Ávila JM. A thermo-catalytic pyrolysis of polystyrene waste review. *Polymers*. 2023;15(6):1582. doi: [10.3390/polym15061582](https://doi.org/10.3390/polym15061582).
21. Park KB, Jeong YS, Guzelciftci B, Kim JS. Two-stage pyrolysis of polystyrene. *Appl Energy*. 2020;259:114240. doi: [10.1016/j.apenergy.2019.114240](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114240).
22. Holtkamp M, Renner M, Matthiesen K, et al. Robust downstream technologies in polystyrene waste pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 2024;205:107558. doi: [10.1016/j.resconrec.2024.107558](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107558).
23. Gonzalez-Aguilar AM, Cabrera-Madera VP, Vera-Rozo JR, Riesco-Ávila JM. Effects of heating rate and temperature on the thermal pyrolysis of expanded polystyrene. *Polymers*. 2022;14(22):4957. doi: [10.3390/polym14224957](https://doi.org/10.3390/polym14224957).
24. Miandad R, Nizami AS, Rehan M, et al. Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste. *Waste Manag*. 2016;58:250–259. doi: [10.1016/j.wasman.2016.09.023](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

***Кизатов Есмагамбет Маратович**

ORCID [0009-0001-1078-3059](https://orcid.org/0009-0001-1078-3059)

e-mail: k1z4.workstation@gmail.com.

Дюсова Ризагуль Муслимовна

канд. техн. наук

ORCID [0000-0003-3083-5255](https://orcid.org/0000-0003-3083-5255)

e-mail: dyussova_rm@enu.kz.

Копишев Эльдар Ертаевич

канд. хим. наук, ассоциированный профессор

ORCID [0000-0002-7209-2341](https://orcid.org/0000-0002-7209-2341)

e-mail: kopishev_eye@enu.kz.

Калиев Олжас Ерланұлы

ORCID [0009-0008-4860-060X](https://orcid.org/0009-0008-4860-060X)

e-mail: kaliyev_oye_3@enu.kz.

AUTHORS' INFO

***Yessmagambet M. Kizatov**

ORCID [0009-0001-1078-3059](https://orcid.org/0009-0001-1078-3059)

e-mail: k1z4.workstation@gmail.com.

Rizagul M. Dyussova

Cand. Sc. (Engineering)

ORCID [0000-0003-3083-5255](https://orcid.org/0000-0003-3083-5255)

e-mail: dyussova_rm@enu.kz.

Eldar Ye. Kopishev

Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor

ORCID [0000-0002-7209-2341](https://orcid.org/0000-0002-7209-2341)

e-mail: kopishev_eye@enu.kz.

Olzhas Ye. Kaliyev

ORCID [0009-0008-4860-060X](https://orcid.org/0009-0008-4860-060X)

e-mail: kaliyev_oye_3@enu.kz.

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding Author