

И.О. Сапаргали*, А.А. Каныкешова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай, С. Азат

¹Satbayev University,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

*e-mail: sapargali.i@mail.ru

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ПОЛИСТИРОЛЬНОГО МИКРОПЛАСТИКА ПРОЦЕССОМ ФЕНТОНА

Аннотация: Проблема накопления полимерных микрочастиц в водных объектах требует поиска новых, более интенсивных методов их разрушения. Одним из наиболее трудноразлагаемых загрязнителей является полистирол. Наличие массивных фенильных групп в его макромолекуле стерически препятствует микробному расщеплению и обеспечивает общую химическую инертность материала. В связи с этим в данной работе исследована окислительная деструкция дисперсных полистирольных частиц в водной среде с использованием гомогенной системы Фентона ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2\text{O}_2$).

Экспериментальную часть проводили в термостатируемых условиях при температуре 35-40°C и кислотности среды pH 2-3. Выбранный узкий диапазон pH критически важен для поддержания ионов железа в каталитически активной форме и предотвращения их осаждения. В этих условиях инициируется активная генерация гидроксильных радикалов ($\cdot\text{OH}$). Обладая высоким окислительным потенциалом, они отщепляют атомы водорода от полимерного каркаса, что неизбежно приводит к разрыву основных углерод-углеродных связей и падению молекулярной массы.

Поверхностные изменения образцов до и после реакции оценивали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). На полученных микрофотографиях четко фиксируется эрозия поверхности пластика: образование выраженных микротрещин, сколов и каверн. Изменение дисперсного состава суспензий дополнительно контролировали методом динамического светорассеяния (ДЛС). Результаты подтвердили значительное смещение размерного распределения частиц в сторону более мелких фракций.

Результаты экспериментов доказывают, что реакция Фентона эффективно запускает окислительное разложение прочных ароматических полимеров. Поэтому данный подход стоит рассматривать как перспективную стадию для систем очистки производственных вод.

Ключевые слова: микропластик; полистирол; процесс Фентона; окислительная деградация; очистка воды.

1. Введение

Увеличение антропогенной нагрузки на окружающую среду, обусловленное интенсификацией промышленного производства, развитием транспортной инфраструктуры и ростом объемов бытовых отходов, выступает ключевым фактором дестабилизации природных экосистем [1]. Регулярные выбросы загрязняющих веществ разрушают природное равновесие. Из-за этого деградируют главные оболочки Земли – вода, почва и воздух, что сегодня считается одной из самых серьезных мировых проблем [2].

Главная экологическая проблема заключается в многокомпонентной природе современного загрязнения. Аккумуляция в биосфере тяжелых металлов, пестицидов и радионуклидов (в частности, ^{137}Cs и ^{90}Sr) на фоне роста концентрации парниковых газов запускает масштабные деструктивные процессы. В результате такого комбинированного воздействия угнетаются целые биоценозы, критически падает уровень биоразнообразия и ускоряется трансформация климата.

Помимо прямого экологического ущерба, миграция токсикантов формирует риски для здоровья и санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Подобная динамика накопления резистентных ксенобиотиков требует разработки и внедрения эффективных инженерно-химических технологий мониторинга и ремедиации загрязненных сред.

В условиях современных глобальных экологических вызовов состояние гидросферы требует особого внимания. Постоянная антропогенная нагрузка истощает водные экосистемы

и ухудшает качество природных вод. Ситуация заметно усложнилась во второй половине прошлого века: интенсивный рост химической индустрии привел к тому, что синтетические полимеры стали одним из основных источников загрязнения водоемов [3].

Главная проблема полимерного загрязнения заключается в высокой термодинамической стабильности и химической инертности макромолекул, что делает их крайне устойчивыми к биологическому разложению [4-6]. В результате формируется масштабный накопительный эффект: по имеющимся оценкам, около 90% всех произведенных пластиковых отходов не подвергаются вторичной переработке, аккумулируясь на полигонах и неизбежно мигрируя в акватории Мирового океана [9].

Находясь в окружающей среде, под воздействием инсоляции, окислительных процессов и механического истирания крупногабаритный пластик подвергается постепенной фрагментации. Этот процесс приводит к образованию микропластика -гетерогенной смеси дисперсных полимерных частиц размером от нескольких нанометров до 5 мм [13]. В отличие от макрообъектов, частицы микропластика обладают высокой удельной площадью поверхности, что позволяет им не только свободно перемещаться по водным бассейнам, но и выступать сорбентами для других загрязняющих веществ, многократно усугубляя экологический ущерб [4]. По происхождению микропластик классифицируют на первичный и вторичный. К первичному относятся промышленные микрогранулы, используемые в качестве абразивных присадок в парфюмерно-косметической продукции и бытовой химии. Вследствие высокой дисперсности данные частицы не задерживаются стандартными барьерами муниципальных очистных сооружений и эмитируются непосредственно в гидросферу. Вторичный микропластик образуется в результате распада более крупных пластиковых отходов. Под совместным действием ультрафиолета, перепадов температур и механического трения воды полимерные цепи разрушаются [7]. Поверхность материала постепенно подвергается эрозии, и пластик распадается на микрочастицы.

Мелкие фрагменты пластика легко распространяются в воде, поэтому сейчас они присутствуют практически во всех водоемах. Из-за сходства размеров с элементами зоо- и фитопланктона микропластик активно заглатывается гидробионтами. Попадая в организм, полимеры блокируют пищеварительную систему и нарушают питание, что резко снижает выживаемость видов. Ситуация усугубляется тем, что поверхность микропластика отлично сорбирует токсичные соединения из воды. Таким образом, эти частицы работают как транспорт, переносящий опасные вещества от одного звена трофической цепи к другому [5].

Для Республики Казахстан мониторинг контаминации гидросферы синтетическими полимерами приобретает особую актуальность. Несмотря на масштабы потенциального ущерба, воздействие микропластика на биоценозы водоемов страны длительное время оставалось малоизученным. В связи с этим принципиальное научно-практическое значение приобретают комплексные полевые исследования, в частности – оценка экологического статуса прибрежных акваторий Каспийского моря, направленная на количественную и качественную инвентаризацию полимерного загрязнения. Результаты анализа натурных проб подтверждают высокий уровень полимерной контаминации исследуемой акватории [10]. Анализ проб показал масштабное загрязнение акватории и прибрежной зоны. В водной толще преобладает микропластик размером 0,69-3,61 мм, основу которого составляют обрывки синтетических рыболовных сетей и лесок. При этом в донных осадках и скоплениях прибрежной растительности оседает более крупный мусор: нейлоновые нити, полиэтилен и различные волокна длиной от 1,4 до 19,7 см и массой до 0,19 г. Концентрация пластика на побережье достигает сотен килограммов на квадратный километр. Загрязнение носит смешанный характер: помимо полимеров, в воде присутствуют частицы металла и краски. Внешний вид и структура найденных фрагментов однозначно указывают на то, что это вторичный пластик – результат распада бытовых отходов и брошенного рыболовного инвентаря.

В структуре идентифицированного загрязнения значительную долю составляют ароматические полимеры, в частности полистирол. Стерические затруднения, создаваемые объемными фенильными группами, придают полистиролу высокую термодинамическую стабильность и делают его крайне резистентным к биodeградации. Этот вид микропластика способен длительное время сохраняться в окружающей среде, проявляя выраженную токсичность для местных биоценозов [4, 8].

Традиционные методы механической сепарации и биологической очистки сточных вод демонстрируют низкую эффективность извлечения микродисперсных пластиков, что требует разработки специализированных физико-химических технологий их деструкции [13]. В инженерии окружающей среды перспективным подходом признано применение передовых окислительных процессов (Advanced Oxidation Processes, AOP), в частности – гомогенной каталитической системы Фентона [6,14]. Метод основан на разложении пероксида водорода (H_2O_2) в присутствии ионов Fe^{2+} , что сопровождается интенсивной генерацией гидроксильных радикалов ($\bullet OH$). Высокий окислительно-восстановительный потенциал данных интермедиатов обеспечивает эффективный неселективный разрыв углерод-углеродных связей полимерной матрицы, инициируя деполимеризацию полистирола вплоть до полной минерализации продуктов распада [7, 10].

В связи с этим целью настоящей работы является исследование закономерностей окислительной деструкции полистирольного микропластика в водной среде под действием каталитической системы Фентона. В рамках исследования установлены оптимальные физико-химические параметры протекания реакции, а также проведена комплексная оценка степени разрушения полимерной матрицы с привлечением методов оптической микроскопии [5], сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) [11] и динамического светорассеяния (ДЛС) [12]. Полученные результаты формируют научно-методическую базу для разработки масштабируемых технологий ремедиации водных объектов, загрязненных устойчивыми полимерными поллютантами [14].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Используемые реактивы и материалы

В качестве модельного микропластика в экспериментах применяли коммерческий гранулированный полистирол (ПС). Для процесса углубленного окисления (Advanced Oxidation Process, AOP) в системе Фентона использовали коммерческие химические реактивы аналитической чистоты без дополнительной очистки. В качестве окислителя применяли водный раствор пероксида водорода (30 мас. %), источником ионов Fe^{2+} и катализатором реакции служил гептагидрат сульфата железа(II) ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$). Корректировку pH реакционной среды осуществляли добавлением 0,1 М раствора серной кислоты (приготовленного из 98 % H_2SO_4) и гидроксида натрия (NaOH). Все рабочие растворы готовили на основе дистиллированной воды.

2.2. Подготовка образцов полистирольного микропластика

Чтобы симитировать то, как микропластик образуется в природе, мы просто механически измельчили исходные гранулы ПС. Затем полученный порошок просеяли через набор лабораторных сит. Это нужно было для того, чтобы выровнять размер частиц и сделать результаты опытов точными. Для дальнейших экспериментов по разложению мы взяли частицы мельче 500 мкм – именно этот размер попадает под стандартное определение микропластика.

2.3. Методика проведения окислительной дегградации

Эксперименты по окислительной деструкции полистирольного микропластика проводили в статическом режиме в стеклянных реакторах рабочим объемом 100 мл.

Навеску полимера массой 0,1 г диспергировали в 50 мл дистиллированной воды. Кислотность полученной суспензии доводили до значения pH 3,0 добавлением 0,1 М раствора H_2SO_4 . Поддержание данного уровня кислотности строго необходимо для сохранения ионов железа в каталитически активной форме и предотвращения их осаждения в виде неактивных гидратированных оксидов $Fe(III)$.

После стабилизации pH в реактор вводили 0,05 г катализатора ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$). Реакцию инициировали прибавлением 1,0 мл 30%-ного раствора H_2O_2 . Процесс вели в изотермических условиях (25 °C) при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке в течение 24 ч. Выбранная продолжительность экспозиции необходима для эффективной диффузии $\bullet OH$ -радикалов в объем полимерной матрицы и обеспечения глубокого разрыва углерод-углеродных связей.

По окончании реакции суспензию фильтровали. Для ингибирования дальнейшего окисления и десорбции остаточных реагентов выделенную твердую фазу многократно промывали дистиллированной водой. Отмытые образцы деградированного микропластика сушили в термощкафу при 60 °C до постоянной массы (данный температурный режим гарантированно исключает термическую деструкцию полистирола).

2.4. Исследование морфологии методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) позволяет получать очень четкие снимки поверхности образца. Микроскоп сканирует поверхность тонким электронным лучом и улавливает отраженные частицы. Если настроить прибор на регистрацию обратно рассеянных электронов, на снимке можно увидеть разницу в составе материала: разные элементы будут отличаться по яркости. В итоге получаются черно-белые снимки, на которых по игре света и тени можно понять, как устроена поверхность: какой размер у частиц, есть ли на них шероховатости, трещины или другие дефекты.

2.5. Исследование методом оптической микроскопии

Макроморфологический контроль исходных и деградированных образцов микропластика осуществляли с помощью оптической микроскопии. Полученные цифровые изображения служили базой для выявления визуально различимых последствий химического разрушения. Основное внимание уделялось трансформации макроморфологии частиц, наличию крупных поверхностных дефектов и деградации оптических свойств материала (помутнение, изменение цвета). Данный анализ выступал в качестве надежного экспресс-метода для подтверждения начальных структурных изменений полистирола перед его детальным исследованием на сканирующем электронном микроскопе.

2.6. Определение дисперсного состава методом динамического светорассеяния (ДЛС)

Количественную оценку изменения размерных характеристик микропластика в процессе окислительной деструкции проводили методом динамического светорассеяния (ДЛС). Анализ эволюции гидродинамического диаметра частиц и индекса полидисперсности (PDI) применяли для инструментального подтверждения фрагментации полистирола. Сравнение кривых распределения частиц по размерам (до и после обработки реактивом Фентона) позволило объективно зафиксировать сдвиг размерных фракций в микро- и нанодиапазон, а также оценить агрегативную устойчивость исследуемых полимерных суспензий.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Визуальная оценка и анализ морфологических изменений методом оптической микроскопии

Эффективность деструкции полимерного субстрата в рамках передового окислительного процесса (AOP) оценивалась путем верификации морфологических изменений микрочастиц. Сравнительный анализ состояния поверхности до и после воздействия системы Фентона ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, экспозиция 24 ч) проводился методом оптической микроскопии.

На микрофотографиях нативного полистирола (рис. 1а) отчетливо визуализируются крупнодисперсные конгломераты, обладающие выраженной геометрической огранкой и прямолинейными границами раздела фаз. Структура исходных фрагментов гомогенна; отсутствие дефектов, микротрещин или развитого порового пространства подтверждает термодинамическую устойчивость и химическую инертность чистого ПС-пластика.

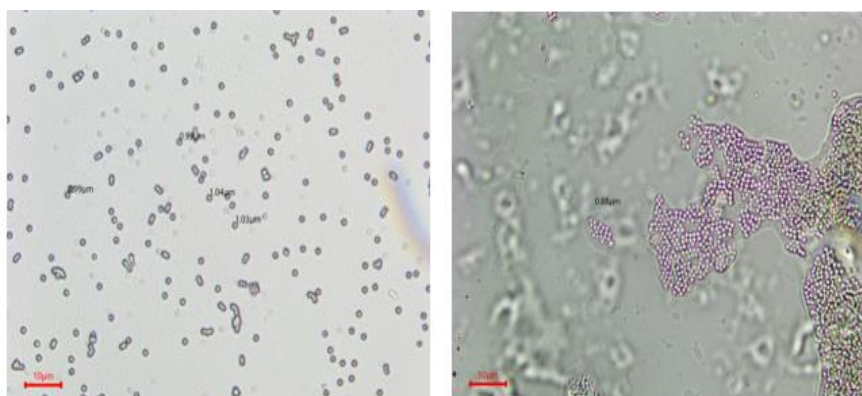


Рисунок 1 – Оптические микрофотографии полистирольного микропластика:

а) исходный образец до обработки; б) образец после окислительной деструкции в системе Фентона (24 часа).

Применение каталитической системы Фентона приводит к существенным изменениям микроструктуры поверхности материала (рис. 1б), вызывая его физико-химическую трансформацию. В результате обработки наблюдается разрушение исходных монолитных структур с образованием мелких фрагментированных частиц, распределённых по поверхности неравномерно. Чёткие границы частиц исчезают, уступая место более размытым и неровным контурам. Поверхность становится более шероховатой, что указывает на разрыхление верхнего слоя материала под действием окислительных процессов.

Наблюдаемые изменения морфологии связаны с воздействием высокоактивных гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$), которые образуются в системе Фентона непосредственно в процессе реакции. Эти радикалы взаимодействуют с полимером, вызывая разрушение углеродной цепи макромолекул полистирола. Основные изменения происходят в приповерхностном слое материала, что приводит к снижению молекулярной массы и накоплению дефектов структуры. В результате ухудшаются механические свойства полимера. Совокупность этих процессов способствует постепенному разрушению частиц и их распаду на более мелкие фрагменты, вплоть до перехода в мелкодисперсное состояние в водной среде.

3.2. Морфологический анализ деструкции поверхности методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)

Результат анализа микроструктурных трансформаций и верификация механизмов деградации полистирола (ПС) проводились с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Микрофотографии образца после 24-часовой экспозиции в среде реагента Фентона, полученные при различных увеличениях (рис. 2), позволяют комплексно охарактеризовать морфологию разрушения полимерной матрицы. Представленная серия снимков визуализирует специфику деструктивных процессов, протекающих на микроуровне под воздействием окислительной системы.

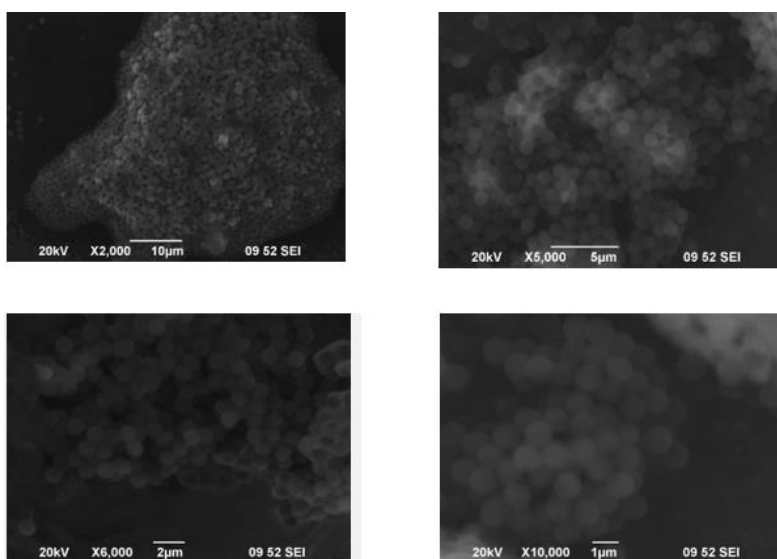


Рисунок 2 – СЭМ-микрофотографии ПС-микропластика после окислительной деградации: а) панорамный вид деградированной частицы ($\times 2000$); б) формирование эрозионных зон и первичной пористости ($\times 5000$); в) ячеистая (сотовая) структура разрушенного полимера ($\times 6000$); г) детальная визуализация субмикронных пор и кратеров ($\times 10000$).

Снимки электронной микроскопии подтверждают, что поверхность частиц полистирола сильно изменилась. На общем плане (рис. 2а) хорошо видно, как деформировались сами частицы и появился сложный рельеф. Если рассмотреть образцы при большом увеличении (рис. 2б, 2в), становится заметна кавернозная структура (множество мелких углублений). Такой рельеф возникает из-за того, что гидроксильные радикалы ($\bullet\text{OH}$) точечно разрушают участки полимерных цепей.

Микрофотографии с максимальным разрешением (рис. 2г, масштаб 1 мкм) позволяют локализовать многочисленные субмикронные поры и каверны. Появление такой пористости на межфазной границе «твёрдое тело – жидкость» служит прямым доказательством необратимой химической деградации макромолекул и ведет к существенному росту удельной

площади поверхности образца. Данный фактор интенсифицирует диффузию реагентов вглубь полимерного каркаса, ускоряя дезинтеграцию частиц и их последующую минерализацию.

Для количественной оценки масштабов деструкции был проведен анализ размерного распределения фрагментов на основе данных СЭМ (рис. 3). На полученных изображениях (увеличение $\times 5000$) зафиксирована выраженная макроскопическая фрагментация, подтверждающая эффективность каталитической системы в процессах разрушения исходного микропластика.

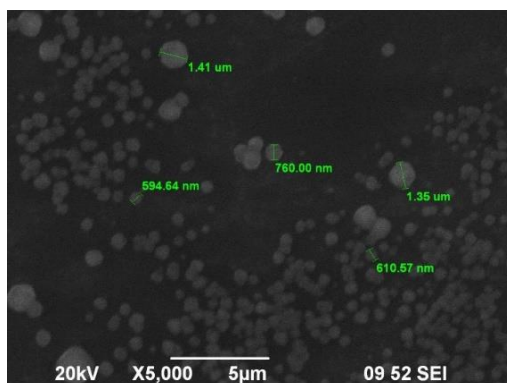


Рисунок 3 – СЭМ-изображение ПС-микропластика с количественным анализом размеров фрагментов после 24-часовой деградации

Экспериментальные данные подтверждают, что окислительная деструкция полимера в системе Fe^{2+} приводит к дезинтеграции монолитной матрицы с образованием дискретных фрагментов микронного и субмикронного масштабов. Размерный анализ указывает на выраженную полидисперсность продуктов распада: в пробах идентифицированы как относительно крупные агрегаты (1,35-1,41 мкм), так и высокодисперсные элементы с характерным размером 590-760 нм.

Наличие фракций нанометрового диапазона свидетельствует о том, что воздействие гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$) не ограничивается поверхностной эрозией, а затрагивает макромолекулярные цепи во всем объеме приповерхностного слоя. Данный механизм разрушения критически важен для технологий водоочистки: измельчение микропластика до наноразмерного состояния резко увеличивает суммарную площадь реакционной поверхности. Это создает условия для интенсификации процессов глубокой минерализации загрязнителей до химических форм с пониженным экотоксикологическим потенциалом.

Прямая визуализация морфологии конечных продуктов деградации, выполненная методом СЭМ при увеличении $\times 10000$ (рис. 4), подтверждает выход процесса разрушения за пределы микроразмерного диапазона. Высокое разрешение снимков позволяет верифицировать формирование структурных единиц, соответствующих наноуровню организации вещества.

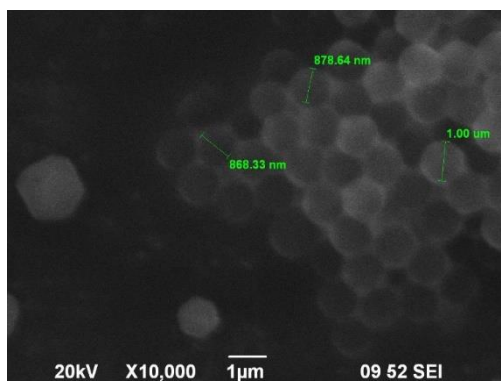


Рисунок 4 – Высокорастворяющее СЭМ-изображение ПС-микропластика: визуализация субмикронных фрагментов и глубокой деструкции сферических структур

На полученных микрофотографиях фиксируются дискретные образования преимущественно сферической и квазисферической морфологии, сформировавшиеся в результате исчерпывающей дезинтеграции полимерной матрицы. Согласно результатам измерений, конечные продукты реакции характеризуются высокой степенью дисперсности: поперечный размер большинства частиц варьируется в узком диапазоне 868-878 нм, что подтверждает их принадлежность к субмикронному уровню.

Изменение формы и поверхности частиц указывает на существенное разрушение полимерных цепей полистирола. Процесс, вероятно, начинается с образования отдельных участков окисления, которые со временем объединяются. В результате исходная структура распадается на более мелкие частицы нано- и субмикронного размера.

Специфика взаимодействия электронного пучка с поверхностью фрагментов – в частности, их частичная проницаемость и визуальное снижение электронной плотности – указывает на разрыхление структуры материала. Данные признаки могут служить косвенным подтверждением интенсивной окислительной модификации полимера, сопровождающейся падением его плотности под воздействием реакционной среды.

3.3. Анализ размерного распределения методом динамического светорассеяния (ДЛС)

Количественная оценка эффективности процесса Фентона и статистическая верификация фрагментации полистирольного микропластика проводились на основе сравнительного анализа распределения частиц по гидродинамическим размерам. Дифференциальные кривые, полученные методом динамического светорассеяния (ДЛС) для исходных и экспонированных образцов, представлены на рисунке 5.

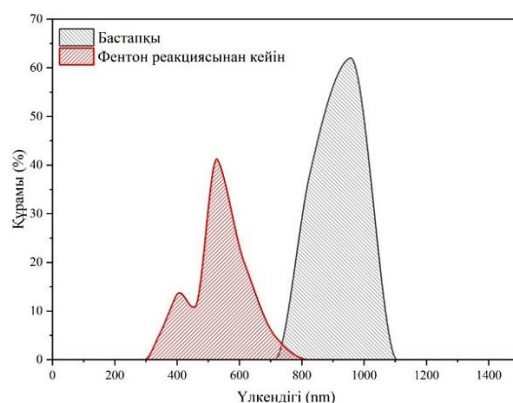


Рисунок 5 – Распределение частиц ПС-микропластика по размерам (DLS) в водной среде до и после процесса Фентона

Анализ исходного образца. Распределение исходного микропластика (серый цвет) имеет один четко выраженный пик в области 900-1100 нм. Основная часть частиц (около 62%) обладает диаметром 950 нм. Это подтверждает, что до начала обработки образцы были достаточно однородными по размеру. Трансформация системы под воздействием реагента Фентона. 24-часовая экспозиция в каталитической среде $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ приводит к радикальной перестройке размерного профиля (красный цвет), смещающегося в область меньших значений. Ключевые изменения параметров распределения заключаются в следующем:

- Гипохромный сдвиг максимума: доминирующий пик смещается в интервал 500-550 нм, фиксируя двукратное уменьшение характерного размера частиц относительно исходного состояния.

- Дифференциация фракций: переход к полимодальному распределению с появлением дополнительного максимума в районе 400 нм свидетельствует о стохастической деструкции макромолекул и интенсивном дроблении первичных конгломератов.

- Частицы стали более разными по размеру: график заметно расширился по сравнению с исходным образцом. Это говорит о том, что процесс разрушения идет по всей массе пластика, а не только на поверхности.

Результаты динамического светорассеяния (ДЛС) коррелируют с данными сканирующей электронной микроскопии. Если снимки СЭМ (рис. 3, 4) показывают форму и размер лишь отдельных кусочков (около 870 нм), то метод ДЛС позволяет увидеть общую

картину для всех частиц в растворе. То, что средний размер уменьшился с 950 нм до 520 нм, прямо доказывает: система Фентона эффективно разрушает пластик.

Разрушение полимерного каркаса увеличивает площадь поверхности микрочастиц, а это необходимое условие для того, чтобы они в итоге полностью разложились (минерализовались). Таким образом, цифры подтверждают: наш метод эффективно дробит устойчивый пластик на очень мелкие фрагменты. Эти частицы гораздо активнее вступают в реакции и легче разрушаются дальше.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает высокую деструктивную эффективность системы Фентона ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) в отношении полистирольного микропластика в водной среде. Комплексный морфологический анализ, выполненный методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), верифицировал необратимый характер деградации полимерной матрицы. Установлено, что атака гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$) инициирует глубокую структурную перестройку исходно инертной поверхности полистирола с формированием разветвленной сети микротрещин, эрозионных каверн и специфической ячеистой морфологии. Пластик заметно разъеден и расслаивается – это значит, что окисление проникло под его поверхность. Оно разрушает структуру полимера, из-за чего материал перестает быть цельным и начинает разрушаться изнутри.

Мы подтвердили разрушение пластика методами ДЛС и СЭМ. Результаты показывают, что средний размер частиц уменьшился почти вдвое – с 950 до 520 нм, а из-за появления мелких осколков разброс размеров стал больше. Снимки под микроскопом также подтверждают наличие фрагментов меньше 1 мкм. Из-за того, что частицы стали мелкими и пористыми, их площадь поверхности выросла. Это помогает реагентам легче проникать внутрь и полностью разрушать полимер. Таким образом, система Фентона при pH 3,0 эффективно расщепляет стойкий пластик.

Список литературы

1. Plastic waste inputs from land into the ocean / J.R. Jambeck et al // *Science*. – 2015. – Vol. 347, № 6223. – P. 768-771.
2. Lost at sea: where is all the plastic? / R.C. Thompson et al. // *Science*. – 2004. – Vol. 304, № 5672. – P. 838-838.
3. Geyer R. Production, use, and fate of all plastics ever made / R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, № 7. – e1700782.
4. Degradation of polystyrene microplastics by Fenton-like process: Mechanism and pathways / Y. Zhang et al // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 384. – P. 121151.
5. Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from environmental samples / A.S. Tagg et al // *Analytical Methods*. – 2017. – Vol. 9, № 9. – P. 1432-1440.
6. Pignatello J.J. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry / J.J. Pignatello, E. Oliveros, A. MacKay // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2006. – Vol. 36, № 1. – P. 1-84.
7. Neyens E. A critical review of Fenton's reagent applications / E. Neyens, J. Baeyens // *Journal of Hazardous Materials*. – 2003. – Vol. 98, № 1-3. – P. 33-50.
8. Oxidative degradation of polystyrene microplastics by advanced oxidation processes / J.H. Kang et al // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 287. – P. 132320.
9. Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution, effects and management / D. He et al // *Engineering*. – 2019. – Vol. 5, № 3. – P. 538-550.
10. Effect of Fenton-like oxidation on surface characteristics and adsorption properties of microplastics / P. Liu et al // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 234. – P. 151-159.
11. Using scanning electron microscopy for the identification of marine microplastic debris / J. Brandon et al // *Marine Pollution Bulletin*. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 556-561.
12. Characterization of microplastics in water using dynamic light scattering / J. Li et al // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 237. – P. 557-563.
13. Degradation of microplastics in the environment: Processes, mechanisms, and influencing factors / J. Wang et al // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 270. – P. 116023.
14. Advanced oxidation processes for microplastics degradation: A recent update / S.S. Ali et al // *Journal of Environmental Management*. – 2023. – Vol. 326. – P. 116742.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН проекта: BR27199301).

И.О. Сапаргали*, А.А. Каныкешова, М.С. Кунарбекова, Ж. Токтарбай, С. Азат

Satbayev University,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22
*e-mail: sapargali.i@mail.ru

ФЕНТОН ПРОЦЕСІМЕН ПОЛИСТИРОЛ МИКРОПЛАСТИГІНІҢ ТОТЫҒУ ДЕГРАДАЦИЯСЫ

Су нысандарында полимерлі микробөлшектердің жиналуы оларды жоюдың жаңа, тиімдірек әдістерін іздеуді талап етеді. Ең қиын ыдырайтын ластанғыштардың бірі – полистирол. Оның құрамындағы ірі фениль топтары микробтардың әсеріне кедергі жасап, материалдың химиялық тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Осыған байланысты, бұл жұмыста Фентон жүйесін ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ / H_2O_2) қолдана отырып, судағы полистирол бөлшектерінің тотығу арқылы ыдырауы зерттелді. Тәжірибелер $35\text{--}40^\circ\text{C}$ температурада және рН 2-3 қышқылдық ортада жүргізілді. рН деңгейін осы тар ауқымда ұстап тұру өте маңызды: бұл темір иондарының белсенді болуына көмектеседі және олардың тұнбаға түсуіне жол бермейді. Мұндай жағдайда гидроксил радикалдары ($\bullet\text{OH}$) белсенді бөліне бастайды. Олар өте күшті тотықтырғыш болғандықтан, полимер қаңқасынан сутегі атомдарын тартып алады. Бұл көміртегі байланыстарының үзілуіне және молекулалық массаның төмендеуіне әкеледі. Реакцияға дейінгі және одан кейінгі үлгілердің беткі өзгерістері оптикалық және сканирлеуші электронды микроскопия (СЭМ) әдістерімен бағаланды. Алынған суреттерден пластик бетінің бұзылғаны анық көрінеді: терең жарықтар, сызаттар мен ойықтар пайда болған. Сонымен қатар, бөлшектердің өлшемі динамикалық жарық шашырату (ДЛС) әдісімен тексерілді. Нәтижелер өңдеуден кейін бөлшектердің едәуір кішірейгенін растады. Тәжірибе нәтижелері Фентон реакциясы төзімді полимерлерді тиімді ыдырататынын дәлелдейді. Сондықтан бұл әдісті өндірістік ағын суларды тазарту жүйелері үшін болашағы зор кезең ретінде қарастыруға болады.

Түйін сөздер: микропластик; полистирол; Фентон процесі; тотығу деградациясы; суды тазарту.

I. Sapargali*, A.A. Kanykeshova, M. Kunarbekova, Zh. Toktarbay, S. Azat

Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22
*e-mail: sapargali.i@mail.ru

OXIDATIVE DEGRADATION OF POLYSTYRENE MICROPLASTIC BY THE FENTON PROCESS

The buildup of plastic microparticles in water is a serious problem that requires new, faster ways to break them down. Polystyrene is one of the toughest pollutants to destroy. Because of its large phenyl groups, microbes can hardly break it down, making the material very stable. In this study, we looked at how to decompose polystyrene particles in water using the Fenton process ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$). We ran the experiments at a stable temperature of $35\text{--}40^\circ\text{C}$ and a pH level of 2-3. Keeping the pH in this narrow range is vital; it keeps the iron active and stops it from settling out as a solid. Under these conditions, the system starts producing hydroxyl radicals ($\bullet\text{OH}$). These radicals are powerful oxidizers that pull hydrogen atoms from the polymer frame, which breaks the carbon-carbon bonds and cuts the size of the molecules. To see how the surface changed before and after the reaction, we used optical and scanning electron microscopy (SEM). The images clearly show the plastic wearing away, with deep cracks, chips, and small pits (cavities) appearing. We also checked the particle sizes using dynamic light scattering (DLS). The data confirmed that the particles became significantly smaller after the treatment. Our results prove that the Fenton reaction effectively starts the breakdown of strong aromatic polymers. Therefore, this method is a promising step for industrial wastewater treatment systems.

Key words: microplastics; polystyrene; Fenton process; oxidative degradation; water treatment.

Information about the authors

Inabat Sapargali* – master student, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Akerke Almaskyzy Kanykeshova – master student, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6517-6933>.

Makhabbat Kunarbekova – PhD, researcher at the Engineering Laboratory, Satbayev University; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-0667>.

Zhexenbek Toktarbay – PhD, Associate Professor, Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4131-0905>.

Seitkhan Azat – PhD, professor, Head of the Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4131-0905>.

Авторлар туралы мәліметтер

Инабат Омирузаккызы Сапаргали* – магистрант, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Ақерке Алмасқызы Қаныкешова – магистрант, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6517-6933>.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – PhD, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-0667>.

Жексенбек Тоқтарбай – PhD, қауым.профессор, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Сәтбаев Университеті; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4131-0905>.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Инженерлік-бейінді зертханасының жетекшісі, Сәтбаев Университеті; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4131-0905>.

Сведения об авторах

Инабат Омирузаккызы Сапаргали* – магистрант, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: sapargali.i@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0258-8277>.

Ақерке Алмасқызы Қаныкешова – магистрант, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: a.aslmasovna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6517-6933>.

Махаббат Сейт-Задаевна Кунарбекова – PhD, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: m.kunarbekova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-0667>.

Жексенбек Тоқтарбай – PhD, ассоц.профессор, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4131-0905>.

Сейтхан Азат – PhD, профессор, Руководитель лаборатории инженерного профиля, Сатбаев Университет; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4131-0905>.

Поступила в редакцию 30.03.2026

Поступила после доработки 25.05.2026

Принята к публикации 28.05.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-77](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-77)

MPHTI: 31.15.01



Д.Р. Мулдаш*, А.Р. Кажмуратов, К.Б. Шакенов, Д.О. Мурзалинов, С. Азат

Satbayev University,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22

*e-mail: muldashevdiyas@gmail.com

МАГНИТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРЕМНЕЗЁМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО КРЕМНИЯ

Аннотация: В данной научно-исследовательской работе подробно изучен процесс магнитермического восстановления (МТВ) аморфного диоксида кремния, извлеченного из рисовой шелухи Кызылординской области, с целью синтеза нанопористого кремния высокой чистоты. Диоксид кремния был экстрагирован методом щелочного выщелачивания с последующим осаждением, что позволило получить прекурсор с развитой удельной поверхностью. В ходе

©Д.Р. Мулдаш, А.Р. Кажмуратов, К.Б. Шакенов, Д.О. Мурзалинов, С. Азат, 2026