АННОТАЦИЯ

к диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе
«8D07113- Наноматериалы и нанотехнологии в химии»
в соответствии с образовательной программой
Бексейтовой Калампыр Сунакбаевны
«Разработка технологии и исследование фильтровально-сорбционной наноструктурированной системы для очистки воды от микропластика и органических загрязнителей»

Общая характеристика работы: Данная диссертационная работа направлена на исследование возможности использования экологически безопасной технологии холодной плазмы для разложения и устранения новых источников загрязнения воды - микропластика и органических загрязнителей. Кроме того, оценивается использование активированного угля в качестве адсорбентов для повышения эффективности очистки воды и достижения высокого уровня очистки.

Актуальность работы: В настоящее время негативное воздействие микропластика и стойких органических загрязнителей (СОЗ) на окружающую среду является одной из глобальных экологических проблем. Мировое научное сообщество активно изучает распространение микропластика в водных экосистемах и его влияние на живые организмы и экосистемные процессы. В докладе ООН по окружающей среде за 2021 год отмечается, что ежегодно в океаны попадает 9–14 миллионов тонн пластиковых отходов, и к 2040 году эта цифра может утроиться. Микропластик — частицы диаметром не более 5 мм — не разлагаются в естественной среде и широко распространяются через водные ресурсы, что вызывает обеспокоенность по поводу их воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Недавние исследования показали, что микропластик может попадать в организм человека через воду, воздух и пищу, вызывая долгосрочные токсические эффекты. По данным ученых, каждый человек потребляет в среднем 5 граммов микропластика в неделю, что примерно равно весу кредитной карты. Эти данные демонстрируют масштабы проникновения микропластика в пищевую цепочку и его потенциальные риски для здоровья.

Применяемые в настоящее время методы (коагуляция, флотация, адсорбция, фотокатализ, биодеградация) часто требуют больших энергетических затрат или приводят к образованию косвенных отходов. В связи с этим разработка эффективных, экологически безопасных систем, сочетающих плазмохимические методы и адсорбционные технологии, является актуальной задачей.

Технология холодной плазмы (ХП) в последние годы признана перспективным методом в процессах очистки воды. Этот метод позволяет полностью минерализовать органические загрязнители в воде, образуя высокореакционноспособные соединения, такие как радикалы и озон.

Необходимость решения проблем очистки воды во всем мире:

- По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), 30% населения мира не имеют доступа к чистой питьевой воде.
- Согласно докладу ЮНЕСКО за 2022 год, снижение качества воды в развивающихся странах ускоряется из-за промышленного и сельскохозяйственного загрязнения.
- Европейское химическое агентство (ECHA) в 2021 году отметило, что микропластик и его производные сохраняются в окружающей среде в течение сотен лет и что необходимо их полное устранение.

Таким образом, совершенствование технологий очистки воды и использование современных методов будет способствовать обеспечению глобальной экологической безопасности. Целью данного исследования является эффективная очистка воды от микропластика и стойких органических загрязнителей путем предложения инновационного метода, сочетающего холодную плазму и активированный уголь.

Цель работы: разработка и исследование эффективной фильтросорбционной наноструктурированной системы очистки воды для деградации микропластика и удаления стойких органических соединений. Данная система направлена на создание экологически безопасной и высокоэффективной технологии очистки воды путем объединения холодной плазмы с активированным углем для адсорбции продуктов разложения.

Задачи диссертационной работы:

- Исследование процесса разложения микропластика до нанопластика под воздействием холодной плазмы. Определение влияния параметров обработки на степень разложения, анализ изменений размеров и морфологии частиц.
- Определение механизма структурных изменений, происходящих в результате окисления под действием активных частиц, образующихся при воздействии плазмы. Оценка кинетики деградации микропластика.
- Оценка адсорбционных свойств активированного угля для полного удаления продуктов разложения микропластика. Исследование изменений пористой структуры, сорбционной способности и механизма сорбции.
- Изучение эффективности очистки воды от органических загрязнителей с применением технологии холодной плазмы. Определение закономерностей деградации и описание механизма химических превращений.

- **Основные положения, выносимые на защиту:**

Обработка холодной плазмой интенсивно фрагментирует полимерные цепи микропластика, разрушая их до наноразмеров. Размер микропластиковых частиц на основе меламиновой смолы уменьшился с 2004±93 нм до 68±5,7 нм, а частиц полистирола уменьшился с 1030±106 нм до 41,6±1,01 нм.

Механизм деградации микропластика заключается в разрыве связей C=C и C–H, что приводит к образованию карбонильных групп (C=O) в результате окислительного разрушения, вызванного активными частицами, генерируемыми плазмой. Концентрация микропластика в 1 мл раствора

увеличивается с 26 630 (количество частиц) до 78 160, фрагментируясь на мельчайшие наночастицы.

Удельная поверхность наноструктурированного активированного угля, полученного из грецких орехов, уменьшение объема микропор составило 28,1% и 31,3%, а у активированного угля, полученного из скорлупы кокосовых орехов, уменьшение объема микропор составило 34,9% и 20,8%, что обусловлено накоплением на поверхности нанотрубок продуктов распада нанопластика. Термогравиметрический анализ показал, что потеря массы активированного угля в диапазоне температур 100–400 °C является результатом термической деградации адсорбированных органических соединений.

Холодная плазма разрушает стабильный органический краситель метиленовый синий с высокой эффективностью — 100% за 25 минут при pH 4 и за 30–35 минут при pH 7 и pH 10.

Объект исследования: холодная плазма, микропластик и стойкие органические загрязнители, активированный уголь.

Предмет исследования: механизмы деструкции микропластика и органических загрязнителей (метиленового синего) под воздействием холодной плазмы, процессы сорбции продуктов их разложения.

Методология исследования: В ходе диссертационной работы были использованы просвечивающая электронная микроскопия, крио-ПЭМ Hitachi ht7800, анализатор дзета-потенциала и размера частиц, Malvern Nano Series (Malvern Instruments Limited, Малверн, Великобритания), метод потеря массы, сканирующая электронная микроскопия, Hitachi s-4800 (Япония), сорбционный анализатор БЭТ (Брунауэра–Эммета–Теллера) с использованием Micromeritics Gemini VII (Micromeritics Instrument Corp, США), инфракрасная спектроскопия Фурье-преобразования (FTIR) с использованием спектрометра Nicolet is50 (Thermo Fisher Scientific, США).

Научная новизна исследования:

Впервые была испытана технология холодной плазмы для разрушения микропластика, и было обнаружено, что этот метод эффективно разрушает микропластик вплоть до наномасштабов.

Уменьшение удельной площади поверхности и объема микропор наноструктурированного активированного угля в результате адсорбции продуктов деградации микропластика продемонстрировало его способность эффективно фильтровать фрагменты наноразмерного пластика и доказало эффективность механизма адсорбции.

Показана высокая эффективность процесса плазмохимического разложения органических загрязнений с использованием холодной плазмы.

Сочетание методов холодной плазмы и сорбции было предложено в качестве новой экологически чистой технологии для полной деградации микропластика и эффективной утилизации продуктов его переработки.

Область применения: Очистка систем водоснабжения и циркуляционных систем, очистки бытовых сточных вод.

Теоретическая и практическая значимость работы. Данное исследование вносит вклад в научное понимание механизмов разрушения микропластика и стойких органических загрязнителей (метиленового синего) под воздействием холодной плазмы. Результаты исследований позволяют теоретически обосновать особенности структурно-химических изменений микропластиков под действием холодной плазмы, закономерности образования продуктов их разложения, а также влияние основных параметров плазменной обработки на эффективность деструкции.

Результаты исследований послужат основой для разработки комплексной системы, сочетающей холодную плазму и активированный уголь для совершенствования технологий очистки воды. Эта технология обеспечивает эффективное удаление микропластика и стойких органических загрязнителей, сводя к минимуму их воздействие на окружающую среду.

Надежность и обоснованность результатов в первую очередь согласуются с данными наблюдений.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается наличием публикаций в зарубежных журналах с высоким импакт-фактором, изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в науке и высшем образовании Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, а также материалами международных научных конференций.

Личный вклад автора: Автор принимал полное участие в исследовательской работе на всех этапах выполнения диссертационной работы: от численных расчетов до выбора метода исследования. Обсуждение отчетов и результатов проводилось совместно с руководителями.

Апробация диссертации:

в журналах рекомендованных КОКНВО:

- Бексейтова К.С., Байменов А.Ж., Жантикеев У.Е., Саулахнаулы Е., Есин В.А., Михаловский С.В., Азат С. Загрязнение пресных вод микропластиком: источники, последствия и стратегии смягчения (обзор литературы) // *Вестник Национального центра Республики Казахстан.* – 2024. – Вып. 1(97). – DOI: 10.52676/1729-7885-2024-1-34-44. – ISSN 1729-7516. – СС 34-43.

- Сеймуханова Л.Н., Жантикеев У.Э., Бексейтова К.С., Кунарбекова М.С., Рахимова Б.У., Кудайбергенов К.К., Азат С. Получение наноцеллюлозы для очистки воды от красителей // *Вестник Национального исследовательского центра Республики Казахстан.* – 2024. – Вып. 4 (декабрь). – DOI: 10.52676/1729-7885-2024-4-181-190. – 10 с.

- Сапаргали И.О., Бексеитова К.С., Жантикеев У.Е., Нургалиев Н.Н., Азат С. Комплексный метод очистки микропластика в воде с использованием сорбентов // *Шәкәрім университетінің хабаршысы. Технические науки* = Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. — 2025. — № 1(17). — С. 51–57. — DOI: 10.53360/2788-7995-2025-1(17)-51. — ISSN 2788-7995 (Print),

в базах данных Scopus и Web of Science:

Bexeitova K., Baimenov A., Varol E.A., Kudaibergenov K., Zhantikeyev U., Sailaukhanuly Y., Toshtay K., Tauanov Z., Azat S., Berndtsson R. Microplastics

in freshwater systems: A review of classification, sources, and environmental impacts // Chemical Engineering Journal Advances. – 2024. – DOI: 10.1016/j.ceja.2024.100649. – JIF 5.5. – Q1. – CiteScore 8.3. – General Chemical Engineering – 83%. – 17 с.

- Bexeitova K., Zhantikeyev U., Yeszhan Y., Sapargali I., Kudaibergenov K., Toshtay K., Mikhalovsky S., Amrousse R., Berndtsson R., Azat S. Evaluating Microplastic Detection Techniques in Human-Impacted Water Systems: A Mini-Review // ES Energy and Environment. – 2024. – Том 25. – DOI: 10.30919/esee1233. – CiteScore 10.7. – Environmental Engineering – 89%. – 15 с.

Kunasheva Z., Kubasheva R., Kuzmina R., Utepkalieva G., Erzhanova N., Aituganova S., Kiisheva D., Bexeitova K. Physical and Chemical Features of The Thermolysis of Wastewater Sludge // Engineered Science. – 2023. – ISSN: 2576-988X (Print), 2576-9898 (Online). – Q1, 98%. – DOI: 10.30919/es991. – 9 с.

- Askaruly K., Azat S., Sartova Z., Bexeitova K., Yeleuov M., Kerimkulova A. Obtaining and characterization of amorphous silica from rice husk // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – ISSN 1314-7471. – CiteScore 1.2. – General Chemical Engineering – 32%. – 9 с.

- Sailaukhanuly Y., Popova A., Mansur T., Bexeitova K., Toshtay K., Tovassarov A., Tasmagambetova A. Preliminary Study and Assessment of Drinking Water from Almaty, Kazakhstan // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2022. – DOI: 10.18321/ectj1478. – ISSN 1562-3920. – JIF 0.655. – Q4. – CiteScore 1.4. – General Chemical Engineering – 29%. – 10 с.

Патент:

Азат С., Жантикеев У.Э., Бексейтова К.С., Тауанов Ж.К., Тоштай К., Сайлауханулы Э., Кудайбергенов К.К. Способ получения сорбента для очистки воды от микропластика // Патент на полезную модель № 8598. – 03.11.2023. – 6 с.

Публикации: Результаты диссертационной работы опубликованы в 13 изданиях, в том числе 5 статей, входящих в базу данных Scopus, 3 публикации в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки Республики Казахстан, 4 в международных научных сборниках, симпозиумах и зарубежных конференциях. Получен 1 патент на полезную модель.

Связь с исследовательскими и государственными программами:

№ AP14869499 «Плазменная очистка воды для разложения стойких полимерных и органических загрязнителей: от микро-к наночастицам до молекул» - 2022–2024 гг.

Объем и структура работы: Диссертация изложена на 115 страницах и состоит из 37 рисунков и 17 таблиц. Работа состоит из введения, обзора литературы, описания объектов и методов исследования, результатов и их обсуждения, выводов, а также списка из 144 ссылок.