Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2025, Том 17, № 2 / 2025, Vol. 17, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2025.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/59NZVN225.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Бондаренко, К. А. Очистка воды от микропластика с использованием полиалюминия хлорида и хитозана / К. А. Бондаренко, Н. А. Политаева // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/59NZVN225.pdf.

For citation:
Bondarenko K.A., Politaeva N.A. Water purification from microplastics using polyaluminium chloride and chitosan. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(2): 59NZVN225. Available at: https://esj.today/PDF/59NZVN225.pdf. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.05

Бондаренко Кристина Александровна
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Россия, Санкт-Петербург
Аспирант
E-mail: metsheryakova.ka@edu.spbstu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1134326

Политаева Наталья Анатольевна
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Россия, Санкт-Петербург
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: politaevana1971@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3522-1925
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439213

Очистка воды от микропластика с использованием полиалюминия хлорида и хитозана

Аннотация. Микропластик представляет собой новый тип загрязняющих веществ, проникающих в организм человека, в том числе с питьевой водой. В связи с этим обеспечение эффективного удаления микропластика из водных источников приобретает особую значимость. Установлено, что микропластик представляет потенциальную угрозу для здоровья человека, поскольку способен накапливаться в организме, вызывать воспалительные процессы и оказывать негативное воздействие на иммунную, эндокринную, репродуктивную, нервную и пищеварительную системы. В данной статье авторами рассматривается использование полиалюминия хлорида (PAC) и хитозана (CTS) для удаления микропластика из воды. В ходе эксперимента было исследовано применение этих флокулянтов в системах очистки воды, направленных на удаление частиц полиэтилентерефталата (ПЭТ), одного из наиболее распространённых загрязнителей. Система PAC+CTS продемонстрировала более высокую эффективность по сравнению с традиционной системой PAC, особенно в нейтральных и щелочных условиях pH. Эксперименты показали, что комбинация этих двух флокулянтов значительно улучшает процесс флокуляции, благодаря чему образуются более плотные и объёмные флоки, способствующие более эффективному осаждению микропластика. Механизм флокуляции включал как нейтрализацию зарядов с помощью ионов Al^{3+}, так и усиливающее воздействие аминогрупп хитозана, что способствовало адсорбции микропластиковых частиц и образованию химических связей. Влияние pH на эффективность процесса показало, что оптимальные результаты были получены при pH 9–11. Этот подход доказал свою

экологическую безопасность, снижая дозировку традиционных химических флокулянтов и обеспечивая более стабильную и эффективную очистку воды. Работа имеет важное значение для разработки экологически чистых методов борьбы с микропластиком, что имеет практическое значение для улучшения качества водных ресурсов.

Ключевые слова: микропластик; полиалюминий хлорид; хитозан; очистка; коагуляция; флокуляция; водоочистка

Введение

В условиях стремительного роста численности населения и повсеместного применения полимерных материалов в различных отраслях — от упаковки и текстиля до косметики и сельского хозяйства — наблюдается существенное увеличение объема пластиковых отходов, а также усложнение проблем, связанных с их утилизацией и воздействием на окружающую среду [1–3].

Микропластик (МП) — это частицы пластика размером менее 5 мм [1–2], представляющие собой устойчивый к биодеградации загрязнитель с комплексной морфологией и химической структурой [3]. Постоянное накопление микропластика в экосистемах приводит к его неизбежному поглощению живыми организмами, включая представителей пищевых цепей человека [4]. Несмотря на то, что основная масса микропластика выводится из организма после перорального поступления [5], определённая доля частиц проникает в ткани через пищеварительный тракт, что может оказывать негативное влияние на репродуктивные и ростовые функции живых организмов [6–7].

На сегодняшний день микропластик выявлен в различных средах: морской воде [8], пресноводных экосистемах [9], почвах [10] и питьевой воде [11]. Наиболее распространёнными полимерными соединениями, обнаруживаемыми в водной среде, являются полиэтилентерефталат (ПЭТ), полиэтилен (ПЭ), поливинилхлорид (ПВХ), полистирол (ПС) и полипропилен (ПП) [12–14]. Основной источник их поступления в водные экосистемы — бытовые сточные воды [15]. В результате миграции по пищевым цепям микропластик способен проникать в организм человека с питьевой водой [16].

Современные системы водоочистки преимущественно применяют классические технологии, в которых флокуляция играет ключевую роль [17–19]. Эффективность процесса во многом определяется свойствами применяемых флокулянтов. Среди традиционно используемых — сульфат алюминия ($Al_2(SO_4)_3$), хлорид железа ($FeCl_3$), а также полиалюминий хлорид (PAC), представляющий собой неорганический полимер из семейства алюминиевых солей. Общая формула PAC может варьироваться в зависимости от степени полимеризации и, как правило, выражается как [$Al_2(OH)_nCl_{6-n}$], где n — число гидроксильных групп.

Флокуляция на основе PAC реализуется за счёт нейтрализации заряда и адсорбции примесей продуктами гидролиза, однако данный процесс имеет ограничения. Так, традиционные флокулянты демонстрируют пониженную эффективность при удалении микропластика и чувствительны к колебаниям параметров водной среды [20]. Более того, избыточное дозирование таких реагентов приводит к образованию значительных объёмов осадка. В целях повышения эффективности и экологичности очистки разработаны композитные флокулянты — сочетания двух и более реагентов, которые позволяют оптимизировать процесс флокуляции и снизить потребление отдельных компонентов [21].

Наиболее перспективным направлением в данном контексте является использование природных органических флокулянтов, таких как хитозан (CTS), целлюлоза, альгинат натрия, дубильные кислоты [22], а также синтетических — полиакриламид (PAM) и его производные

[23]. Хотя PAM демонстрирует выраженный эффект «мостиковой» флокуляции, его применение ограничено потенциальной токсичностью остаточного мономера акриламида [24; 25]. Это подчёркивает необходимость разработки безопасных и эффективных альтернатив.

Одним из таких решений является внедрение хитозана — продукта деацетилирования хитина, получаемого преимущественно из панцирей ракообразных [26; 27]. Хитозан обладает выраженной адсорбционной способностью и экологической безопасностью благодаря катионной природе аминогрупп ($^{-}NH_2$), которые взаимодействуют с ионами водорода в водной среде и обеспечивают электростатическое притяжение загрязняющих частиц [22].

Согласно последним исследованиям, комбинация PAC и CTS демонстрирует повышенную эффективность при удалении микропластика по сравнению с использованием PAC в одиночку [28].

Целью настоящего исследования являлось удаление ПЭТ-микропластика из природной воды с использованием коагуляционно-флокуляционного метода с последующим осаждением. Задачами исследования были:

- оценка эффективности комбинированной системы PAC+CTS для удаления микропластика;
- определение влияния pH на флокуляционные характеристики данной системы;
- анализ механизма взаимодействия флокулянтов с микропластическими частицами.

Методы и материалы

Для определения содержания микропластика в пробах водных объектов был применён комплекс аналитических процедур, включающий этапы пробоподготовки, очистки, разделения по плотности, фильтрации и микроскопического анализа.

Методика, используемая в данном исследовании, основана на ранее опубликованных авторами разработках [29].

Подготовка проб.

Анализ содержания микропластика осуществляется в четыре последовательных этапа:

1. Разделение по плотности.

Для отделения микропластика от взвешенных частиц использовался 55%-ный раствор хлорида цинка ($ZnCl_2$) с плотностью около 1,6 г/см³. Альтернативным методом разделения частиц микропластика по плотности является использование насыщенного раствора хлорида натрия (NaCl) плотностью около 1,2 г/см³.

2. Удаление органических веществ.

Примеси органической природы устранялись методом мокрого перекисного окисления. Процедура включала использование перекиси водорода (H_2O_2) в термостате с водяной баней при температуре 75°C. По завершении окисления образец фильтровался через металлический фильтр с размером ячеек 100 мкм. Оставшиеся твердые частицы промывались дистиллированной водой и переносились в стеклянные чашки Петри.

3. Сушка.

Полная сушка осуществлялась при комнатной температуре до полного удаления влаги.

4. Идентификация микропластика.

Визуальная идентификация частиц проводилась с использованием оптического микроскопа Микмед-5 в режиме проходящего света при увеличении 40× (объектив 4×, окуляры 10×). Получение микрофотографий осуществлялось с применением видеоокуляра ToupCam с разрешением 2 592×1 944 пикселя.

Материалы.

В исследовании применялись следующие вещества и реагенты:

- Хитозан — природный флокулянт, приобретённый у различных производителей:
  1. Хитозан № 1 — порошкообразный биополимер (ООО «Хитозановые технологии», г. Энгельс, Россия).
  2. Хитозан № 2 — белый порошок (Orison Chemicals Limited, Китай), размер частиц: 80 mesh (не менее 95 %), сырьё — панцири креветок и крабов.
  3. Хитозан № 3 — порошок светлого оттенка, размер частиц: 80 mesh (не менее 95 %).
- Полиалюминий хлорид (PAC) — коагулянт марки PAC-30-V2 от компании «ХимПищеПром» (г. Санкт-Петербург), представляющий собой кристаллический порошок, предназначенный для очистки питьевой и сточной воды.
- Микропластик — измельчённый вручную полиэтилентерефталат (ПЭТ) с размером частиц в пределах 100–300 мкм.

Все используемые реактивы приобретались в компании «ЛенРеактив».

Отбор проб воды.

Пробоотбор проводился в различных точках Санкт-Петербурга (СПб) и Ленинградской области, охватывая как урбанизированные, так и природные водоёмы. Обоснование выбора точек основано на их экологической значимости, уровне загрязнения и доступности для мониторинга. Полный перечень координат и наименований приведён в таблице 1 и составлен авторами статьи.

Таблица 1

Координаты точек отбора проб

Образец	Широта	Долгота
1. Жемчужный пляж Финского залива, СПб	59.862318 с.ш.	30.13883 в.д.
2. Дудергофский канал, СПб	59.858029 с.ш.	30.158977 в.д.
3. Матисов канал, СПб	59.855923 с.ш.	30.151503 в.д.
4. Нева, Кронверкский пролив, СПб	59.952452 с.ш.	30.315221 в.д.
5. Нева, Ленинградская область, Отрадное	59.784813 с.ш.	30.796088 в.д.
6. Нева, СПб	59.852360 с.ш.	30.488516 в.д.
7. Оз. Глазок, Ленинградская область	60.295214 с.ш.	29.299173 в.д.
8. Оз. Верхнее-Суздальское, СПб	60.037850 с.ш.	30.311592 в.д.
9. Пруд в Таврическом саду, СПб	59.946627 с.ш.	30.375219 в.д.
10. Оз. у сада Бенуа, СПб	60.018494 с.ш.	30.371455 в.д.
11. Парк Сосновка, точка 1, СПб	60.021623 с.ш.	30.365078 в.д.
12. Парк Сосновка, точка 2, СПб	60.024645 с.ш.	30.364021 в.д.
13. Парк Сосновка, точка 3, СПб	60.028964 с.ш.	30.357651 в.д.
14. Парк Сосновка, точка 4, СПб	60.028031 с.ш.	30.350059 в.д.
15. *Примечание*: проба № 15 представляет собой водопроводную воду, используемую для сопоставления с природными источниками		

Составлено авторами

Результаты

Постановка эксперимента по флокуляции и количественной оценке микропластика.

Для эксперимента была отобрана наиболее загрязнённая проба воды. В рамках лабораторного моделирования были подготовлены четыре образца объёмом по 500 мл, налитые в стеклянные стаканы. Значение pH исходной воды составляло 7,6. Каждый стакан был предварительно промаркирован.

Подготовка реагентов и дозировка.

На электронных аналитических весах Shimadzu ATX224 с точностью 0,0001 г были отмерены следующие количества реагентов:

- Полиалюминий хлорид (PAC) — 0,02 г (что соответствует 20 мг/л);
- Хитозан (CTS) — 0,05 г (50 мг/л);
- Микропластик ПЭТ — 0,4 г, по 0,1 г на каждый стакан.

Дозировка PAC соответствовала стандартным параметрам, используемым на действующих водоочистных сооружениях.

Порядок проведения флокуляции.

Во все четыре стакана добавлялись микропластик и PAC. Затем в три из них вводился CTS следующих типов:

- стакан 1 — хитозан № 1;
- стакан 2 — хитозан № 2;
- стакан 3 — хитозан № 3;
- стакан 4 служил контрольным и CTS не содержал.

Флокуляция проводилась с применением перемешивающего устройства ЛАБ-ПУ-1 в следующем режиме:

1. 215 об/мин — в течение 30 секунд (интенсивное перемешивание);
2. 50 об/мин — 10 минут (медленное перемешивание);
3. 50 об/мин — 10 минут (стабилизация флок);
4. Отстаивание — 30 минут.

После завершения процесса, образовавшиеся хлопья и осаждённые частицы микропластика фильтровались через металлический фильтр с размером ячеек 100 мкм.

Полученный осадок был высушен при температуре 65°C в течение 40 минут. Затем материал подвергался микроскопическому анализу.

Визуализация и результаты наблюдения

В результате микроскопирования были обнаружены преимущественно нитевидные частицы микропластика синего цвета различных размеров.

Обнаруженные частицы варьировались по размеру от 31 до 224 мкм. Наличие микропластика было зафиксировано даже в пробе водопроводной воды (№ 15), что подчёркивает масштаб проблемы.

Некоторые частицы микропластика представлены на рисунках 1, 2.

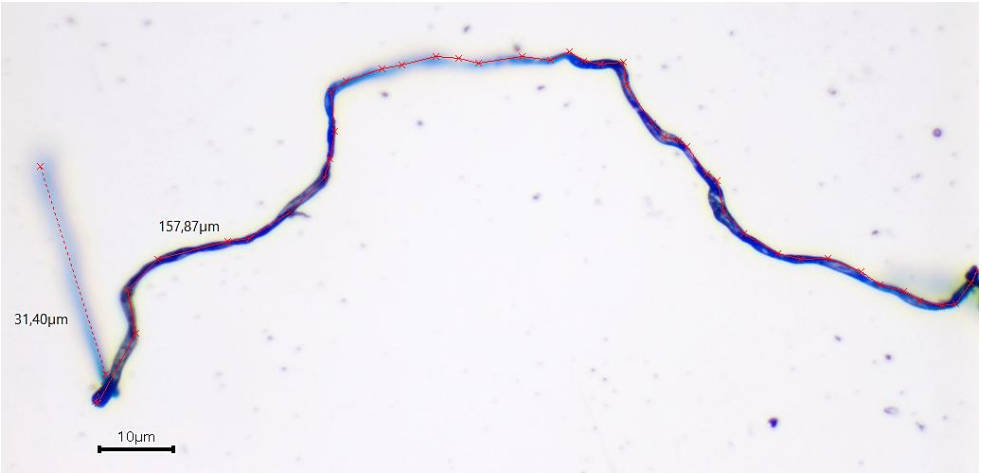

Рисунок 1. *Нитевидные частицы микропластика размерами 157,8 мкм и 31,4 мкм в пробе № 4 (фото авторов)*

Рисунок 2. *Нитевидная частица микропластика размером 116,9 мкм в пробе № 15 (фото авторов)*

Обозначения применяемых систем.

Для последующего анализа эффективности очистки вводятся следующие обозначения:

- Система PAC+CTS — композитная система флокуляции, включающая полиалюминий хлорид и хитозан.
- Система PAC — система, содержащая только полиалюминий хлорид.

Эффективность системы PAC, усиленной CTS-хитозаном, для удаления ПЭТ-микропластика:

В первых трёх стаканах, содержащих хитозан от разных производителей, после перемешивания образовались флоки с трёхмерной сетчатой структурой в процессе флокуляции. Наибольшие флоки образовались в третьем стакане. Это связано с высокой поверхностной площадью хитозана и его сильной адсорбционной способностью, что позволяет эффективно захватывать загрязняющие вещества и осаждать их.

В стаканах № 3 и № 4 наблюдалось наибольшее и наименьшее количество образовавшихся флоков соответственно. После добавления PAC, произошло гидролизование, в ходе которого образовались продукты, содержащие ионы Al^{3+}, которые нейтрализовали отрицательные заряды, переносимые частицами ПЭТ. Это привело к сжатию электрического

двойного слоя ПЭТ-микропластика, что ослабило отталкивание зарядов между частицами и снизило их стабильность. Введение хитозана усилило гидролиз новых веществ, что привело к ещё большему компрессионному эффекту электрического двойного слоя и, как следствие, улучшению седиментации частиц ПЭТ через столкновение и агрегацию.

При перемешивании PAC и CTS в стаканах образовывались большие количества флоков. После прекращения перемешивания, флоки с микропластиком оседали. Наблюдения морфологии флоков показали, что флоки системы PAC+CTS имели больший объём, большую плотность, более эффективную очистку и большее количество частиц микропластика (рис. 3 а). Введение CTS-хитозана значительно усилило эффект образования флоков в системе PAC. Более того, длинноцепочечная структура, обнаруженная на поверхности частиц ПЭТ в системе PAC+CTS, обеспечивала более высокую адсорбцию, что дополнительно способствовало эффективному удалению микропластика. Напротив, флоки, образованные в системе PAC, были маленькими и рыхлыми, с редкими гидролизатами и слабым адсорбционным эффектом (рис. 3 б), что привело к менее эффективной очистке и флокуляции микропластика в этой системе.

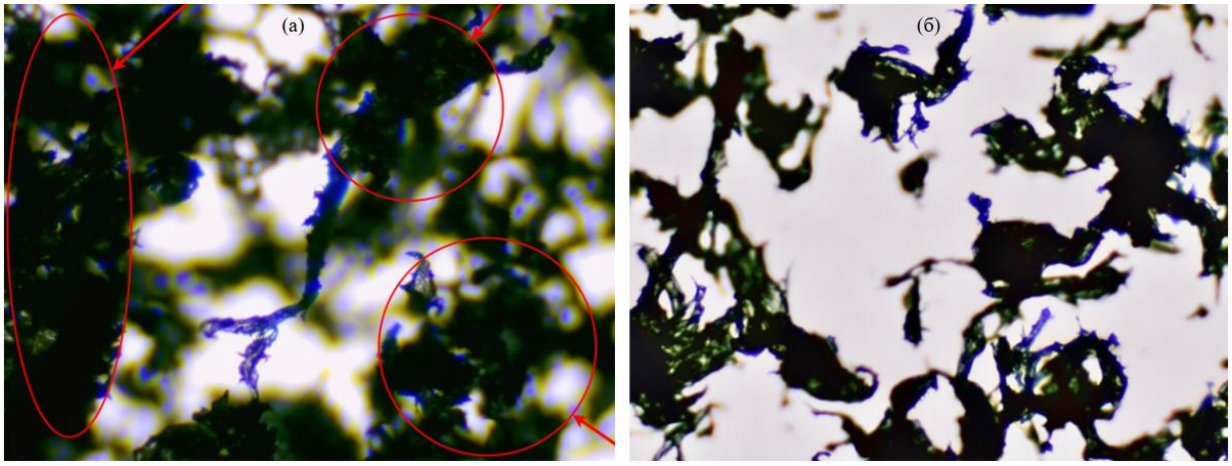

Рисунок 3. *Эффект образования хлопьев под микроскопом*
(а) в системе PAC+CTS (стакан № 3) (б) в системе PAC (стакан № 4) (фото авторов)

Влияние pH на эффективность флокуляции.

Изучение эффективности системы PAC+CTS при различных значениях pH.

Для выявления зависимости эффективности удаления микропластика от кислотно-щелочной среды была проведена серия экспериментов с варьированием значения pH. Исходные условия для всех образцов были идентичны: каждый из пяти стаканов содержал по 500 мл воды с исходным уровнем pH 7,6.

Подготовка реагентов.

В каждую колбу вносились следующие реагенты:

- полиэтилентерефталат (ПЭТ) — 0,1 г (концентрация 200 мг/л);
- полиалюминий хлорид (PAC) — 0,002 г (2 мг/л);
- хитозан № 3 — 0,05 г (50 мг/л).

Хитозан № 3 был выбран на основе предыдущих результатов как наиболее эффективный в процессе образования флокул (хлопьев).

Модификация кислотно-щелочной среды.

Изменение pH осуществлялось следующим образом:

- Для создания кислой среды использовалась разбавленная соляная кислота (HCl, 1:1):
  - pH = 3: добавлено 1 мл раствора HCl;
  - pH = 5: добавлено 0,3 мл HCl;
  - pH = 6: добавлено 0,1 мл HCl.
- Для создания щелочной среды применялся раствор гидроксида натрия (NaOH), полученный растворением 0,5 г NaOH в 250 мл дистиллированной воды:
  - pH = 9: добавлено 2 мл раствора NaOH;
  - pH = 11: добавлено 9 мл раствора NaOH.

После корректировки pH в колбах происходило перемешивание на мешалке в течение 10 минут. Далее растворы отстаивались, и осевшие флокулы фильтровались через металлический фильтр с размером ячеек 100 мкм. Полученный осадок сушили при температуре 65°C в течение 40 минут, после чего проводился микроскопический анализ частиц.

Результаты и интерпретация.

Анализ результатов показал, что эффективность удаления микропластика в кислой среде (pH 3–5) значительно снижалась как для системы PAC, так и для композитной системы PAC+CTS. При нейтральном и щелочном pH (pH = 7,6–11) наблюдалось существенное повышение эффективности флокуляции, особенно при использовании системы PAC+CTS.

Было установлено, что даже при колебаниях pH композитная система демонстрирует более высокую эффективность, чем использование PAC в одиночку. Максимальная флокуляционная активность наблюдалась в области слабощелочной реакции среды (pH 9–11), при этом объём и плотность осадка также возрастали.

Механизм флокуляции.

Повышенная эффективность системы PAC+CTS обусловлена синергетическим действием двух компонентов:

- Ионы Al^{3+}, образующиеся в результате гидролиза PAC, способствуют нейтрализации отрицательного заряда на поверхности частиц микропластика, вызывая их агрегацию.
- CTS, обладая протонируемыми аминогруппами, усиливает эффект электростатического сжатия двойного слоя и способствует образованию мостиков между частицами.

Гидролиз PAC с последующим взаимодействием с хитозаном приводит к образованию химических связей (например, $Al\text{-}NH_2$), что усиливает сорбцию микропластика и формирует плотные трёхмерные флокулы. Особенно выражен этот эффект при pH, благоприятном для гидролиза ионного алюминия — от нейтрального до слабощелочного.

Обсуждение

В предыдущем исследовании [28] авторы установили, что в системах PAC и PAC-CTS, при начальных значениях pH 3 и 5, эффективность удаления микропластика ПЭТ снижалась в каждой из этих систем в разной степени. При увеличении pH до 11 скорость удаления микропластика ПЭТ в системе PAC достигала своего пикового значения. Однако, при дальнейшем увеличении pH, скорость удаления микропластика ПЭТ с использованием системы

PAC+CTS не продемонстрировала значительного улучшения. Увеличение pH способствовало усилению гидролиза Al^{3+}, что улучшало эффект удаления, что согласуется с результатами нашего исследования. Авторы [28] также отмечают, что эффективность очистки воды с использованием системы PAC и PAC+CTS была существенно снижена при низких значениях pH, что совпадает с нашими выводами. Следовательно, более низкий pH ингибирует процесс гидролиза Al^{3+}, что может негативно сказаться на образовании флоков.

В данном исследовании продемонстрирована высокая эффективность флокуляции и механизм удаления ПЭТ-микропластика с использованием системы PAC, улучшенной хитозаном. При чрезмерной дозировке флокулянтов эффект удаления микропластика в системе PAC+CTS снижался из-за всплывания флоков и образования слизистых оболочек на поверхности воды. Механистический анализ флокуляции показал, что хитозан (CTS) усиливает сжатие электрического двойного слоя на частицах ПЭТ. Кроме того, между PAC и CTS произошла химическая реакция, приводящая к образованию новой химической связи $Al\text{-}NH_2$, что усиливает эффект химической адсорбции. Экспериментальные данные, учитывающие различные факторы, показали, что система PAC+CTS обладает лучшей адаптацией к различным условиям, чем система PAC. Авторы [28] также указали, что система PAC+CTS демонстрирует хорошие результаты при удалении микропластика ПВХ, ПЭ, ПП и ПС из воды. В сравнении с другими системами флокуляции, система PAC+CTS продемонстрировала наилучшую комплексную эффективность удаления различных типов микропластика.

Несмотря на большое количество исследований, посвящённых удалению микропластика с помощью флокуляции, результаты традиционной флокуляции также могут быть весьма эффективными. Так, в работах Чжоу и соавт. [29], Ма и соавт. [18], а также Раджалы и соавт. [31] максимальная скорость удаления микропластика при использовании традиционных флокулянтов на основе алюминия и железа достигала 61 %, 75 % и 99 % соответственно. Тем не менее, композитная флокуляция имеет ряд преимуществ перед традиционными методами. В исследовании Шахи и соавт. [30] была продемонстрирована высокая эффективность удаления ПЭ с помощью комбинации квасцов и катионного полиаминового (ПК) песка, в то время как Чжан и соавт. [32] достигли стабильной скорости удаления микропластика ПЭ более 85 % с использованием композитной флокуляции магнитного коагулянта гидроксида магния (MMHC) и полиакриламида (PAM). В сравнении с традиционной флокуляцией, композитная флокуляция отличается большей стабильностью и эффективностью при удалении микропластика. Однако, при использовании флокулянтов на основе алюминия, существует риск для здоровья, связанный с их чрезмерным применением.

В этом исследовании в систему PAC был введён природный полимерный флокулянт хитозан (CTS), что позволило снизить дозировку традиционных флокулянтов и одновременно повысить эффективность удаления микропластика. Таким образом, в отличие от других исследований, удаление микропластика с использованием системы PAC+CTS в данном случае является более полным, с меньшими рисками для здоровья и высокой эффективностью флокуляции.

Следует отметить, что эффективность хитозана CTS во многом зависит от его структурных особенностей. На данный момент исследования, посвящённые структурным свойствам хитозана, являются неполными. Из-за сложности структуры полимера и различных характеристик загрязняющих веществ в воде, необходимы дополнительные исследования, чтобы глубже понять эффективность флокуляции с использованием хитозана и его производных. Это позволит разработать более эффективные, стабильные и экологически безопасные методы для удаления загрязняющих веществ из воды. Кроме того, для более полного сравнения результатов следует исследовать эффективность удаления различных типов микропластика с различными размерами частиц с использованием системы PAC+CTS.

Например, результаты других исследований показали, что эффективность удаления мелких частиц полистирола была наименьшей, но всё же составляла около 40%, в то время как скорость удаления частиц среднего размера из поливинилхлорида достигала 90%, и этот процесс был более стабильным, чем в других системах флокуляции.

Заключение

В настоящем исследовании была подтверждена высокая эффективность композитной системы флокуляции PAC+CTS для удаления ПЭТ-микропластика из воды. По сравнению с традиционной системой на основе PAC, введение хитозана способствовало улучшению адсорбции, ускорению осаждения частиц и снижению необходимой дозировки коагулянта.

Результаты демонстрируют, что оптимальные условия для удаления микропластика достигаются при нейтральном и щелочном pH. Также подтверждено, что структурные особенности CTS существенно влияют на эффективность флокуляции.

Будущие исследования должны быть направлены на системное изучение взаимодействия различных типов микропластика с флокулянтами природного происхождения, а также на разработку универсальных и экологически безопасных методов водоочистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cole M. et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review // Marine pollution bulletin. — 2011. — Т. 62. — № 12. — С. 2588–2597.
2. Horton A.A. et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // Science of the total environment. — 2017. — Т. 586. — С. 127–141.
3. Coppock R.L. et al. Microplastics alter feeding selectivity and faecal density in the copepod, Calanus helgolandicus // Science of the total environment. — 2019. — Т. 687. — С. 780–789.
4. Farrell P., Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: Mytilus edulis (L.) to Carcinus maenas (L.) // Environmental pollution. — 2013. — Т. 177. — С. 1–3.
5. Jung J.W. et al. Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep-sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape // Environmental Pollution. — 2021. — Т. 270. — С. 116217.
6. Bertoldi C. et al. First evidence of microplastic contamination in the freshwater of Lake Guaíba, Porto Alegre, Brazil // Science of the Total Environment. — 2021. — Т. 759. — С. 143503.
7. Li J. et al. Enhance in mobility of oxytetracycline in a sandy loamy soil caused by the presence of microplastics // Environmental Pollution. — 2021. — Т. 269. — С. 116151.
8. Sun J. et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal // Water research. — 2019. — Т. 152. — С. 21–37.
9. Andrady A.L. The plastic in microplastics: A review // Marine pollution bulletin. — 2017. — Т. 119. — № 1. — С. 12–22.
10. Jiang J.Q. Occurrence of microplastics and its pollution in the environment: A review // Sustainable production and consumption. — 2018. — Т. 13. — С. 16–23.

11. Koelmans A.A. et al. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality //Water research. — 2019. — T. 155. — C. 410–422.

12. Skaf D.W. et al. Removal of micron-sized microplastic particles from simulated drinking water via alum coagulation // Chemical Engineering Journal. — 2020. — T. 386. — C. 123807.

13. Ma B. et al. Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment // Chemical Engineering Journal. — 2019. — T. 359. — C. 159–167.

14. Liu W. et al. A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms // Environment International. — 2021. — T. 146. — C. 106277.

15. Zhang Y. et al. Removal efficiency of micro-and nanoplastics (180 nm — 125 μm) during drinking water treatment // Science of The Total Environment. — 2020. — T. 720. — C. 137383.

16. Lee C.S., Robinson J., Chong M.F. A review on application of flocculants in wastewater treatment // Process safety and environmental protection. — 2014. — T. 92. — № 6. — C. 489–508.

17. Bolto B., Gregory J. Organic polyelectrolytes in water treatment //Water research. — 2007. — T. 41. — № 11. — C. 2301–2324.

18. Tang S. et al. The coagulation behavior and removal efficiency of microplastics in drinking water treatment // Journal of Water Process Engineering. — 2023. — T. 53. — C. 103885.

19. Zhang Y. et al. Enhanced removal of polyethylene terephthalate microplastics through polyaluminum chloride coagulation with three typical coagulant aids // Science of the Total Environment. — 2021. — T. 800. — C. 149589.

20. Zhou G. et al. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and $FeCl_3$ coagulation: Performance and mechanism // Science of the Total Environment. — 2021. — T. 752. — C. 141837.

21. Renault F. et al. Chitosan for coagulation/flocculation processes-an eco-friendly approach // European Polymer Journal. — 2009. — T. 45. — № 5. — C. 1337–1348.

22. Wu X. et al. Distinct coagulation mechanism and model between alum and high Al13-PACl // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. — 2007. — T. 305. — № 1-3. — C. 89–96.

23. Rinaudo M. Chitin and chitosan: Properties and applications // Progress in polymer science. — 2006. — T. 31. — № 7. — C. 603–632.

24. Cho J. et al. Viscoelastic properties of chitosan solutions: Effect of concentration and ionic strength // Journal of Food Engineering. — 2006. — T. 74. — № 4. — C. 500–515.

25. Bouyakoub A.Z. et al. $MnCl_2$ and $MgCl_2$ for the removal of reactive dye Levafix Brilliant Blue EBRA from synthetic textile wastewaters: an adsorption/aggregation mechanism // Journal of hazardous materials. — 2011. — T. 187. — № 1-3. — C. 264–273.

26. Mcyotto F. et al. Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation // Chemical Engineering Journal. — 2021. — T. 405. — C. 126674.

27. Wang S. et al. Preparation and coagulation-flocculation performance of covalently bound organic hybrid coagulant with excellent stability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. — 2020. — Т. 600. — С. 124966.

28. Huang L. et al. Chitosan enhances poly aluminum chloride flocculation system removal of microplastics: effective, stable, and pollution free // Journal of Water Process Engineering. — 2023. — Т. 54. — С. 103929.

29. Бондаренко К.А. Удаление частиц микропластика из природных вод г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области с помощью микроводорослей Chlorella Kessleri / К.А. Бондаренко, Н.В. Зибарев, Н.А. Политаева, Д.А. Пугачева, В.Ю. Белоусова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2024. — Т. 13. — № 1(65). — С. 218–226. — EDN: WIBVSY.

30. Shahi N.K. et al. Removal behavior of microplastics using alum coagulant and its enhancement using polyamine-coated sand // Process Safety and Environmental Protection. — 2020. — Т. 141. — С. 9–17.

31. Rajala K. et al. Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine-based chemicals // Water Research. — 2020. — Т. 183. — С. 116045.

32. Zhang Y. et al. Coagulation removal of microplastics from wastewater by magnetic magnesium hydroxide and PAM // Journal of Water Process Engineering. — 2021. — Т. 43. — С. 102250.

Bondarenko Kristina Alexandrovna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: metsheryakova.ka@edu.spbstu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1134326

Politaeva Natalia Anatolyevna
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: politaevana1971@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3522-1925
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=439213

Water purification from microplastics using polyaluminium chloride and chitosan

Abstract. Microplastics are a new type of pollutants that enter the human body, including through drinking water. In this regard, ensuring the effective removal of microplastics from water sources is of particular importance. It has been established that microplastics pose a potential threat to human health, as they can accumulate in the body, cause inflammatory processes and have a negative impact on the immune, endocrine, reproductive, nervous and digestive systems. In this article, the authors consider the use of polyaluminium chloride (PAC) and chitosan (CTS) to remove microplastics from water. During the experiment, the use of these flocculants in water purification systems aimed at removing particles of polyethylene terephthalate (PET), one of the most common pollutants, was investigated. The PAC+CTS system has demonstrated higher efficiency compared to the traditional PAC system, especially in neutral and alkaline pH conditions. Experiments have shown that the combination of these two flocculants significantly improves the flocculation process, resulting in denser and more voluminous flocks that contribute to more efficient deposition of microplastics. The flocculation mechanism included both charge neutralization with $Al3^{+}$ ions and the reinforcing effect of chitosan amino groups, which promoted the adsorption of microplastic particles and the formation of chemical bonds. The effect of pH on the efficiency of the process showed that optimal results were obtained at pH 9–11. This approach has proven its environmental safety by reducing the dosage of traditional chemical flocculants and providing more stable and efficient water treatment. The work is important for the development of environmentally friendly methods for combating microplastics, which is of practical importance for improving the quality of water resources.

Keywords: microplastics; polyaluminium chloride; chitosan; purification; coagulation; flocculation; water treatment