УДК 628.35:544.723

АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОРБЕНТОВ

Мухамедов Жамалиддин Кабилджанович
PhD хим.. наук, соискатель,
Ташкентский химико-технологический институт
Турабджанов Садриддин Махамаддинович
д-р техн. наук, профессор, академик
Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова.
Мухамедов Кабилджан Гафурович
д-р. тех. наук, профессор,
Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова.
Ши-сянь Вячеслав Викторович
соискатель, Ташкентский химико-технологический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Аннотация. Рассмотрены научные предпосылки применения природных и модифицированных сорбционных материалов для удаления ионов тяжёлых металлов из промышленных сточных вод. Особое внимание уделено роли химии поверхности, пористой структуры, кислотно-основных свойств среды и наличия конкурирующих компонентов. Показано, что целенаправленная модификация сорбента может повысить число доступных активных центров и селективность взаимодействия с ионами металлов. Обоснована целесообразность комплексной оценки сорбента не только по способности снижать остаточное содержание загрязнителя, но и по регенерируемости, устойчивости, доступности сырья и экологичности последующего обращения с отработанным материалом.

Ключевые слова: сточные воды, тяжёлые металлы, адсорбция, модифицированный сорбент, очистка воды, поверхность, селективность, регенерация

Загрязнение природных и техногенных вод ионами тяжёлых металлов относится к числу наиболее устойчивых экологических проблем. Источниками таких загрязнений являются металлургические, горнодобывающие, гальванические, химические, машиностроительные и ряд других производств. Особенность тяжёлых металлов заключается в том, что они не разрушаются в водной среде по механизмам, характерным для многих органических веществ, а переходят между растворённой, коллоидной и связанной формами, сохраняя потенциальную токсичность.

Для удаления ионов металлов из сточных вод применяют химическое осаждение, коагуляцию, ионный обмен, мембранные процессы, электрохимические методы и адсорбцию. Адсорбционная очистка представляет особый интерес при необходимости глубокой доочистки и при работе с относительно низкими остаточными концентрациями загрязнителей. Её технологическое преимущество связано с возможностью варьировать природу сорбента, площадь поверхности, пористость и функциональный состав активных центров.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

К перспективным материалам относятся активированные угли, природные цеолиты, глинистые минералы, кремнийсодержащие материалы, оксиды металлов, полимерные сорбенты, а также материалы, получаемые из растительного и промышленного сырья. Однако применение исходных материалов без предварительной обработки не всегда обеспечивает требуемую селективность. В связи с этим научный интерес представляет модификация поверхности, направленная на изменение заряда, кислотно-основных свойств и химической природы функциональных групп.

При оценке эффективности сорбционного материала необходимо учитывать не только снижение концентрации ионов металлов после контакта с сорбентом. Важными критериями являются скорость установления равновесия, стабильность материала в рабочем диапазоне pH, устойчивость к многократному использованию, возможность регенерации и отсутствие вторичного загрязнения. Такой подход позволяет перейти от оценки отдельного лабораторного показателя к формированию научно обоснованных требований к сорбенту для технологического применения.



Рис. 1. Концептуальная диаграмма факторов, влияющих на эффективность адсорбционного удаления ионов тяжёлых металлов

Как показано на рис. 1, результат очистки формируется под совместным воздействием нескольких факторов. pH определяет состояние поверхности сорбента и химическую форму ионов металлов. Доза и дисперсность материала влияют на доступную площадь контакта, а продолжительность взаимодействия определяет полноту массопереноса. Исходная концентрация загрязнителя формирует движущую силу процесса, тогда как сопутствующие ионы могут конкурировать за активные центры и снижать селективность.

Особое значение имеет химическая модификация поверхности. В зависимости от природы исходного материала обработка может обеспечивать появление дополнительных кислородсодержащих, азотсодержащих или иных функциональных групп, способных участвовать

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

в комплексообразовании, ионном обмене и электростатическом взаимодействии. При этом задача исследования состоит не в максимальном усложнении состава сорбента, а в установлении такого способа модификации, который обеспечивает воспроизводимое улучшение сорбционных свойств при приемлемой стоимости и технологичности.

Для научного обоснования применения модифицированного сорбента целесообразно исследовать его исходное и обработанное состояние с использованием совокупности физико-химических методов. Сведения о функциональных группах поверхности могут быть получены спектроскопическими методами, особенности фазового состава — рентгенодифракционным анализом, а изменение текстурных характеристик — методами исследования поверхности и пористой структуры. Сопоставление этих данных с результатами очистки позволяет выявить связь между строением материала и его функциональными свойствами.

При работе с реальными сточными водами принципиально важно учитывать многокомпонентность системы. В модельных растворах сорбент взаимодействует преимущественно с выбранным ионом, тогда как в производственных стоках присутствуют соли, органические вещества, взвешенные частицы и конкурирующие катионы. Поэтому перспективная технология должна подтверждать работоспособность не только в модельных условиях, но и на реальных или максимально приближённых к ним объектах.

Отдельным направлением является обращение с отработанным сорбентом. Если после насыщения материал превращается в трудноутилизируемый опасный отход, экологический эффект очистки снижается. В этой связи предпочтение следует отдавать материалам, допускающим регенерацию, безопасную стабилизацию или контролируемое последующее использование при соблюдении требований экологической безопасности.

Таблица 1. Критерии комплексной оценки сорбционного материала

Критерий	**Научное значение**	**Практическое значение**
Химия поверхности	Определяет механизм связывания ионов	Влияет на селективность сорбента
Пористость и дисперсность	Формируют доступность активных центров	Определяют скорость и полноту очистки
Устойчивость в рабочей среде	Показывает стабильность структуры	Снижает риск вторичного загрязнения
Регенерируемость	Характеризует обратимость взаимодействия	Снижает расход материала и объём отходов
Доступность сырья	Определяет воспроизводимость получения	Влияет на себестоимость технологии

Таким образом, перспективность адсорбционной технологии определяется совокупностью структурных, химических и технологических характеристик материала. Для решения задач очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов целесообразно разрабатывать модифицированные сорбенты с управляемой химией поверхности и подтверждённой устойчивостью в многокомпонентных средах.

В рамках дальнейшего исследования целесообразно установить зависимости между способом модификации, изменением структуры поверхности и способностью сорбента снижать содержание конкретных ионов тяжёлых металлов. Полученные закономерности могут служить

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

основой для выбора состава материала и разработки технологического режима адсорбционной очистки промышленных сточных вод.

Литература

1. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review // Journal of Hazardous Materials. 2003. Vol. 97. P. 219–243.
2. Wang J., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future // Biotechnology Advances. 2009. Vol. 27. P. 195–226.
3. Foo K.Y., Hameed B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 156. P. 2–10.
4. Crini G., Lichtfouse E., Wilson L.D., Morin-Crini N. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment // Environmental Chemistry Letters. 2019. Vol. 17. P. 195–213.
5. Насирова Н.К., Мухамедов К.Г., Назирова Р.А., Турсунов Т.Т. Изучение возможности извлечения тяжёлых металлов из шламов гальванического производства // Ўзбекистон композицион материаллар. 2019. № 2. С. 126–130.
6. Мухамедов К.Г., Насирова Н.К. Изучение возможности применения шламов водоочистки гальванических производств в производстве строительных композиционных материалов // Universum: технические науки. 2020. № 12-4 (81). С. 5–9.
7. Насирова Н.К., Мухамедов К.Г., Аширбекова Д.Р. Применение золы Ангренской ТЭС и водорастворимого полиэлектролита серии «ФЭАП» при очистке сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Ўзбекистон кимё журнали. 2020. № 6. С. 14–20.
8. Мухамедов К.Г., Насирова Н.К., Мухамедов Ж.К., Абдурахманов О.Х. Очистка сточных вод гальванических производств реагентным методом // Universum: технические науки. 2023. № 7-3 (112). С. 51–56.
9. Nasirova N.K., Mukhamedov K.G., Mutalov Sh.A., Mukhamedov J.K. Study of flocculation properties of modified polyacrylamide // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2789. Article 020013. DOI: 10.1063/5.0145723.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.