УДК 628.35:544.723

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА АДСОРБЦИОННОЕ УДАЛЕНИЕ ИОНОВ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

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. Обоснована необходимость системного выбора технологических параметров адсорбционной очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов. Рассмотрено влияние pH, дозы сорбента, продолжительности контакта, исходного содержания загрязнителя и многокомпонентного состава воды. Предложена последовательность оптимизации процесса, включающая предварительную характеристику объекта, подбор рабочего диапазона pH, определение рационального расхода сорбента, установление времени контакта и контроль остаточного содержания металлов. Подчёркнута роль многофакторного планирования эксперимента для выявления совместного действия факторов и формирования технологически обоснованного режима очистки без избыточного расхода реагентов и сорбционных материалов.

Ключевые слова: адсорбция, тяжёлые металлы, сточные воды, pH, время контакта, доза сорбента, оптимизация, многофакторный эксперимент

Разработка адсорбционной технологии очистки сточных вод требует не только выбора эффективного материала, но и определения рациональных условий его применения. Один и тот же сорбент при различных значениях pH, дозировке, продолжительности контакта и составе водной среды может демонстрировать существенно различающиеся результаты. Поэтому оптимизация технологических параметров должна рассматриваться как самостоятельная научная задача.

На первом этапе необходимо провести характеристику исходной сточной воды. Для адсорбционной очистки важны кислотность среды, содержание взвешенных веществ, минерализация, присутствие органических компонентов и соотношение целевых и сопутствующих ионов. Эти показатели определяют возможные механизмы конкуренции за поверхность сорбента и позволяют корректно выбрать диапазон экспериментальных факторов.

Одним из наиболее значимых параметров является pH. Изменение кислотности влияет на заряд поверхности сорбционного материала, состояние функциональных групп и форму

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

нахождения металлов в растворе. При слишком низких значениях pH активные центры могут быть заняты ионами водорода, тогда как чрезмерное повышение pH способно приводить к образованию малорастворимых соединений металлов. Поэтому рабочий диапазон должен подбираться так, чтобы наблюдаемый эффект был связан преимущественно с адсорбцией, а не с побочными процессами осаждения.

Доза сорбента определяет суммарное количество доступных центров связывания. Увеличение расхода материала обычно повышает полноту удаления загрязнителя, однако после определённого уровня дальнейшее увеличение дозировки становится экономически неэффективным. Научно обоснованный режим должен обеспечивать требуемое качество очистки при минимально достаточном расходе материала.

Продолжительность контакта характеризует время, необходимое для переноса ионов из объёма раствора к поверхности и во внутреннюю пористую структуру сорбента. На начальных стадиях процесс может протекать интенсивно, а затем постепенно замедляться по мере заполнения наиболее доступных активных центров. Поэтому технологически важно определить не максимальное, а рациональное время обработки, после которого дальнейшее выдерживание не даёт существенного улучшения качества воды.

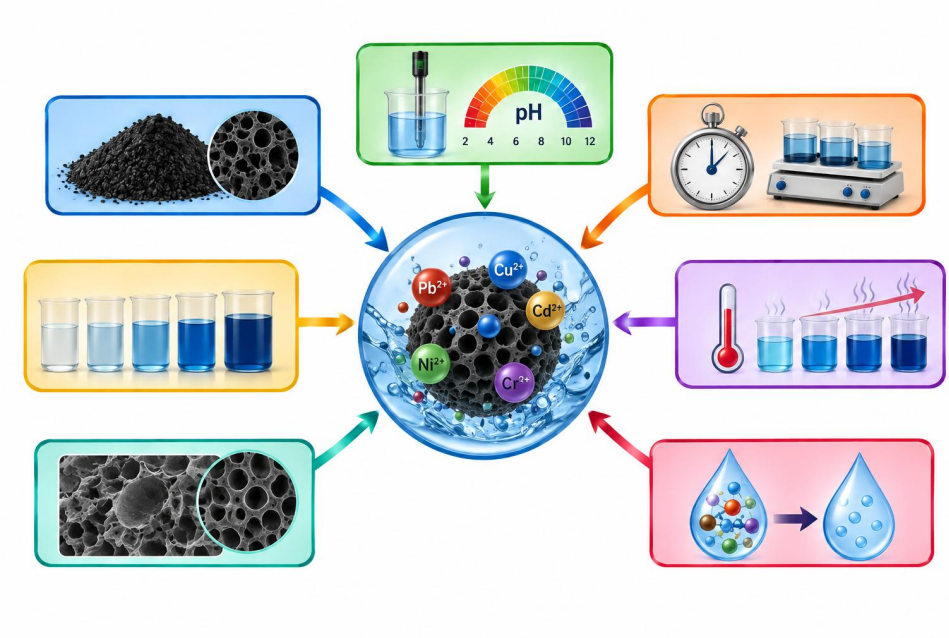


Рис. 1. Диаграмма последовательности оптимизации адсорбционного процесса очистки сточных вод

Представленная на рис. 1 последовательность подчёркивает, что оптимизация начинается с характеристики исходного объекта, а завершается аналитическим контролем остаточного содержания металлов. Если требуемое качество не достигнуто, параметры корректируют по результатам предыдущего цикла, сохраняя контролируемое изменение факторов. Такой подход обеспечивает воспроизводимость экспериментов и позволяет установить причины изменения эффективности очистки.

Важным методическим условием является раздельное изучение факторов на предварительном этапе и последующее исследование их совместного действия. Однофакторные

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

эксперименты позволяют определить рабочие интервалы, однако не показывают взаимодействия между параметрами. Например, влияние дозы сорбента может зависеть от pH, а рациональное время контакта — от исходной концентрации загрязнителя. Поэтому на этапе оптимизации целесообразно использовать многофакторное планирование эксперимента и регрессионный анализ.

Математическая обработка результатов должна быть направлена не только на получение статистически значимой модели, но и на её физическую интерпретацию. Коэффициенты модели позволяют оценить относительную роль факторов, а анализ взаимодействий — выявить сочетания параметров, при которых достигается наибольший технологический эффект. При этом полученный оптимум необходимо подтверждать дополнительными экспериментами в прогнозируемой области.

Для реальных сточных вод требуется учитывать конкурирующую адсорбцию. Присутствие нескольких катионов может изменять распределение активных центров и снижать извлечение отдельных компонентов. Поэтому после оптимизации на модельной системе следует проводить проверку выбранного режима на многокомпонентной воде и оценивать устойчивость результата при изменении состава стока.

Практическая пригодность технологического режима определяется также возможностью разделения фаз после контакта, регенерацией сорбента, объёмом образующихся отходов и энергетическими затратами. Режим, обеспечивающий высокую степень очистки при чрезмерно большом расходе сорбента или длительном времени контакта, не может считаться оптимальным для масштабирования.

Таблица 1. Основные параметры оптимизации адсорбционной очистки

Фактор	**Что необходимо установить**	**Критерий рационального выбора**
pH	Рабочий диапазон без доминирования осаждения	Стабильное удаление металлов и сохранность сорбента
Доза сорбента	Минимально достаточный расход материала	Требуемая очистка без избыточного расхода
Время контакта	Период достижения устойчивого уровня очистки	Отсутствие значимого улучшения при дальнейшем выдерживании
Исходная концентрация	Рабочий диапазон загрузки сорбента	Сохранение эффективности при изменении состава стока
Сопутствующие ионы	Степень конкурентного влияния	Стабильность результата в многокомпонентной системе

Таким образом, эффективная адсорбционная очистка должна основываться на системном выборе технологических параметров, а не на изолированном подборе одного показателя. pH, доза сорбента, время контакта, исходное содержание металлов и состав сточной воды образуют взаимосвязанную систему факторов, определяющую конечный результат.

Использование многофакторного экспериментального подхода позволяет сократить число испытаний, выявить значимые взаимодействия и сформировать технологически обоснованный режим. В дальнейшем такой режим может быть положен в основу масштабирования процесса,

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

разработки аппаратурной схемы и оценки технико-экономической целесообразности адсорбционной очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов.

Литература

1. Foo K.Y., Hameed B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 156. P. 2–10.
2. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 390. Article 122156.
3. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment // Environmental Chemistry Letters. 2019. Vol. 17. P. 145–155.
4. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review // Journal of Environmental Management. 2011. Vol. 92. P. 407–418.
5. Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2019.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.