

УДК 66.081.6

ФИЛИМОНОВА О.С., аспирант (ТГТУ)
ХОРОХОРИНА И.В., д.т.н., доцент (ТГТУ)
Научный руководитель ХОРОХОРИНА И.В., д.т.н., доцент (ТГТУ)
г. Тамбов

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДЕИОНИЗАЦИИ КАК НАИЛУЧШЕЙ ДОСТУПНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ХРОМА

Хром (включая Cr(III) и особенно токсичный Cr(VI)) относится к числу приоритетных загрязнителей водной среды вследствие высокой токсичности, мобильности в водных системах и способности накапливаться в организмах. Промышленные источники хромовых стоков — гальванические производства, кожевенные и химические предприятия — создают локальные очаги высокого загрязнения, требующие надежных технологий очистки и извлечения металла для последующей регенерации или обезвреживания. Совокупность экологических рисков и строгие нормативные требования делают задачу эффективной очистки стоков от ионов хрома критической для обеспечения экологической безопасности.

В литературе описан широкий спектр подходов к удалению Cr из сточных вод: химическое осаждение и восстановление, адсорбция на сорбентах и наноматериалах, ионообмен, электрохимические методы (включая электроосаждение и электрохимию), мембранные процессы (включая нанофильтрацию/обратный осмос), а также комбинированные схемы. Многие обзорные работы подчёркивают, что, несмотря на высокую эффективность удаления некоторыми методами, остаются ограничения, связанные с затратами реагентов, образованием побочных потоков, регенерацией материалов и эксплуатацией при реальных условиях [1].

Технология электродеионизации (ЭДИ) сочетает принципы электродиализа и ионного обмена: ионообменные смолы в ячейках обеспечивают высокую локальную сорбцию ионов, а приложенное электрическое поле обеспечивает непрерывную электрическую регенерацию смол и перенос ионов через ионообменные мембранные в концентратные камеры. Это позволяет получать стабильный поток обессоленной/очищенной воды без периодической химической регенерации смол, что снижает расход реагентов и объём регенерационных отходов. Обзорная статья [2] подчёркивает применение EDI для удаления токсичных ионов и радиоактивных загрязнителей, а также отмечает необходимость оптимизации процесса (конфигурации, материалов, энергоэффективности).

Что касается применения EDI к удалению ионов хрома, то имеются экспериментальные и лабораторные работы, показывающие высокую степень удаления Cr(VI) и Cr(III) при оптимизированных режимах. Например, в работе [3] было предложено упрощённое устройство SEDI (simplified electrodeionization) без анионных мембран специально для удаления Cr(VI) из синтетических сточных вод: концентрация была снижена с 50 мг/л до менее чем 0,5 мг/л,

потребление энергии составило $\sim 8,4$ кВт·ч/моль Cr(VI), а регенерация смолы продемонстрировала повторяемость.

В работе [4] полученные результаты свидетельствуют о том, что при повышении приложенного напряжения плотность тока увеличивается линейно для всех исследуемых видов ионообменных смол. В то же время у смол смешанного типа отмечается более заметный рост тока за счет расширения областей взаимодействия между анионообменными и катионообменными компонентами, что способствует снижению сопротивления системы.

В работе [5] проведено исследование изменения концентрации ионов Cr⁶⁺ в растворе при различной плотности тока в зависимости от времени эксперимента и произведен расчет степени очистки. Установлено, что степень очистки при плотности тока 40 А/м² составила 98,4%.

В контексте концепции «наилучшей доступной технологии» (НДТ), предлагающей не только высокую эффективность удаления загрязнителей, но и низкое воздействие на окружающую среду, минимизацию образования отходов, оптимальное потребление энергии и ресурсов, технология EDI выглядит привлекательным вариантом для интеграции в схемы очистки хромсодержащих стоков. В частности, её способность непрерывной регенерации смол (без химреагентов) и управления концентратами соответствует ключевым показателям экологической и экономической эффективности.

Исходя из изложенного, цель данной работы — просмотреть современные достижения в применении электродеионизации для удаления ионов хрома, оценить её соответствие критериям НДТ (эффективность удаления, ресурсная и энергетическая эффективность, управление концентратами) и предложить рекомендации по внедрению ЭДИ в технологические схемы очистки хромсодержащих стоков. В статье рассматриваются: принцип работы EDI, ключевые факторы, влияющие на эффективность удаления хрома, сравнение с альтернативными методами и экономико-экологическая оценка применения ЭДИ как НДТ.

В таблице 1 представлено сравнение наиболее распространённых технологий удаления ионов хрома из сточных вод по основным показателям эффективности, эксплуатационным и экологическим характеристикам.

Таблица 1

Метод очистки	Механизм удаления	Эффективность удаления, %	Преимущества	Недостатки	Экологическая оценка
Химическое осаждение	Восстановление Cr(VI) до Cr(III) и осаждение в виде гидроксидов	90–99	Простота, низкая стоимость реагентов	Большое количество осадка, требуется рН-коррекция	Средняя (отходы требуют утилизации)
Адсорбция (активированный уголь, биосорбенты)	Физико-химическое связывание ионов на поверхности сорбента	70–98	Дешёвое сырьё, повторное использование сорбентов	Снижение эффективности при высокой концентрации	Высокая при применении биосорбентов

Ионный обмен	Замещение ионов $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ на функциональных группах смолы	90–99	Высокая селективность, возможность регенерации	Требуется химическая регенерация смол	Средняя (используются реагенты)
Мембранные методы (нанофильтрация, обратный осмос)	Фильтрация ионов через полупроницаемую мембрану под давлением	95–99	Высокая эффективность, отсутствие химреагентов	Образование концентрата, высокая энергоёмкость	Высокая (при правильной утилизации концентрата)
Электродеионизация	Совмещение ионного обмена и электромиграции под действием поля	95–99,9	Без реагентов, непрерывная регенерация смол, низкие отходы	Чувствительность к загрязнениям, высокая стоимость оборудования	Очень высокая (соответствует критериям НДТ)

Из таблицы видно, что электродеионизация является одной из наиболее перспективных технологий очистки сточных вод от ионов хрома, сочетая высокую эффективность, низкое образование отходов и соответствие принципам наилучших доступных технологий (НДТ).

Были проведены экспериментальные исследования изменения концентрации ионов хрома (Cr(VI)) в процессе очистки сточных вод различными методами. Графики демонстрируют динамику уменьшения концентрации с течением времени при различных технологических подходах.

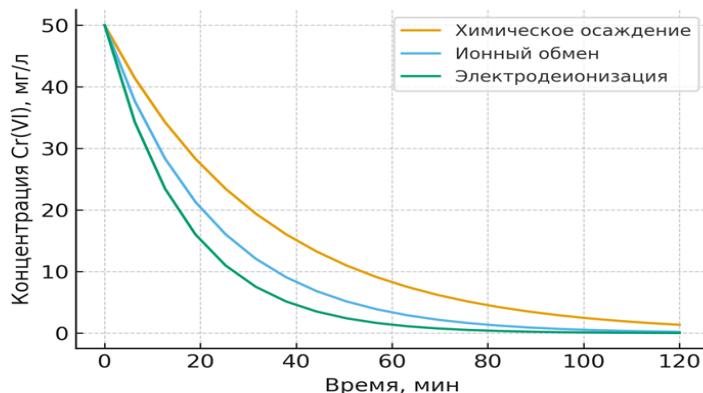


Рисунок 1. Зависимость концентрации ионов Cr(VI) от времени при различных методах очистки

Наиболее быстрое снижение концентрации наблюдается при применении электродеионизации, что связано с одновременным протеканием процессов ионного обмена и электромиграции.

Проведённый сравнительный анализ показал, что скорость снижения концентрации ионов хрома во времени существенно зависит от применяемого

метода очистки. Химическое осаждение и ионный обмен обеспечивают удовлетворительное снижение концентрации загрязнителя, однако требуют применения реагентов, генерируют вторичные отходы и нуждаются в периодической регенерации сорбентов. В отличие от них, электродеионизация демонстрирует наиболее интенсивное и стабильное удаление ионов Cr(VI), что подтверждается более крутым спадом концентрационной кривой на графиках.

Электродеионизация сочетает механизмы ионного обмена и электромиграции, обеспечивая непрерывную регенерацию ионообменных смол без применения химических реагентов. Отсутствие стадий химической регенерации значительно снижает образование вторичных загрязнений и эксплуатационные затраты, а также улучшает экологический баланс технологии.

С позиции концепции наилучших доступных технологий электродеионизация отвечает основным критериям устойчивости:

- высокая эффективность удаления тяжёлых металлов (до 99%);
- минимизация образования отходов и реагентной нагрузки;
- возможность интеграции в существующие мембранные схемы очистки;
- энергоэффективность и ресурсосбережение.

Таким образом, электродеионизация может быть рекомендована как перспективная НДТ для глубокой очистки сточных вод от ионов хрома, особенно в сочетании с предварительными методами (осаждение, фильтрация или сорбция), где она обеспечивает финишную полировку воды до нормативных показателей и способствует переходу предприятий к замкнутым водооборотным циклам.

Список литературы:

1. Peng H., Guo J. Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review. *Environmental Chemistry Letters.* 2020; 18(6):2055–2068. DOI:10.1007/s10311-020-01058-x.
2. Rathi B.S., Kumar P.S. Electrodeionization theory, mechanism and environmental applications. A review. *Environmental Chemistry Letters.* 2020; DOI:10.1007/s10311-020-01006-9.
3. Jin Q., Yao W., Chen X. Removal of Cr(VI) from wastewater by simplified electrodeionization. *Desalination and Water Treatment.* 2020; 183:301–306. DOI:10.5004/dwt.2020.25099.
4. Филимонова О.С., Лазарев С.И., Хорохорина И.В. Анализ вольт-амперных кривых в использовании различных видов ионообменных смол в процессе электродеионизационной очистки хромсодержащих растворов / Филимонова О.С., Лазарев С.И., Хорохорина И.В. // «Актуальные вопросы электрохимии, экологии и защиты от коррозии»: материалы IV Международной конференции: 15 - 17 октября 2025 года. – Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2025. – С. 248-251.
5. Filimonova, O. Efficiency of electrodeionization extraction of chromium ions from galvanic solutions / O. Filimonova, I. Khorokhorina, S. Lazarev // Ion transport in organic and inorganic membranes : Conference Proceedings, Sochi, 25–30 may 2025. – Best Print (Krasnodar), 2025. – P. 59-61. – EDN NZXRRA.

