

УДК 628.16

ПРЕНКО А.В., студент гр. 25-СБ-СТ6 (КубГТУ),

ТЛЕХУСЕЖ М.А., к. х. н., доцент (КубГТУ)

Научный руководитель ТЛЕХУСЕЖ М.А., к. х. н., доцент (КубГТУ)

г. Краснодар

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Пресная вода представляет собой фундаментальный ресурс, необходимый для устойчивого функционирования экосистем и развития человеческой цивилизации. Однако в условиях интенсивной промышленной деятельности и урбанизации водные ресурсы планеты сталкиваются с беспрецедентной антропогенной нагрузкой. Особую озабоченность вызывает загрязнение водных объектов токсичными тяжелыми металлами, такими как свинец, кадмий, ртуть, мышьяк и хром, а также устойчивыми органическими соединениями - пестицидами, фармацевтическими препаратами, красителями и продуктами нефтепереработки. Значительный вклад в данную проблему вносят промышленные сточные воды таких отраслей, как горно-обогатительная, металлургическая и целлюлозно-бумажная промышленность. Сброс неочищенных или недостаточно очищенных стоков, содержащих сульфаты и тяжелые металлы, создает серьезную угрозу для экологического равновесия природных систем.

Опасность тяжелых металлов обусловлена их способностью к кумулятивному действию - они накапливаются в органах и тканях живых организмов, в том числе в почках, печени и поджелудочной железе человека. Помимо общего токсического эффекта, они обладают аллергенным, тератогенным и мутагенным действием, что делает их одними из наиболее приоритетных загрязнителей для удаления.

В связи с этим разработка и внедрение эффективных методов очистки сточных вод от тяжелых металлов и органических загрязнителей является одной из ключевых задач современной химии и технологии, имеющей первостепенное значение как в нашей стране, так и за рубежом [1].

Несмотря на широкое распространение традиционных методов очистки воды, таких как коагуляция, флотация, ионообмен и адсорбция на активированном угле, эти подходы обладают существенными ограничениями в контексте удаления стойких загрязнений. Рассмотрим принципы работы и ключевые недостатки каждого метода.

Процесс осветления воды традиционно начинается с коагуляции и флокуляции. Коагуляция заключается в дестабилизации коллоидных и взвешенных частиц посредством добавления реагентов-коагулянтов (сульфата алюминия, хлорида железа(III) и др.), что приводит к образованию микрохлопьев. Последующая флокуляция с применением высокомолекулярных

флокулянтов, таких как полиакриламид, способствует агрегации хлопьев в крупные флокулы, легко удаляемые отстаиванием или фильтрацией. Хотя эти методы эффективны для снижения мутности и цветности, они демонстрируют низкую эффективность в отношении растворённых ионов тяжёлых металлов и полярных органических соединений [2].

Адсорбция на таких материалах, как активированный уголь, алюмосиликаты или синтетические смолы, широко применяется для удаления органических веществ, обуславливающих запахи и привкусы, а также некоторых тяжёлых металлов и нефтепродуктов. Процесс реализуется в адсорбционных колоннах, однако его эффективность сильно варьирует в зависимости от свойств сорбента и характера загрязнений. Главными ограничениями являются слабая способность активированного угля адсорбировать полярные органические вещества и ионы металлов, а также необходимость дорогостоящей замены или регенерации насыщенного адсорбента.

Ионообменный метод, основанный на применении ионитов, обеспечивает умягчение воды и глубокую деминерализацию за счёт избирательного обмена ионов. Несмотря на высокую эффективность при умягчении, в присутствии конкурирующих ионов селективность и ёмкость ионообменных смол в отношении целевых ионов тяжёлых металлов резко снижаются [3].

К общим системным недостаткам рассмотренных традиционных методов относится образование значительных объёмов вторичных отходов: шламов коагуляции, концентрированных элюатов от регенерации ионообменных смол и отработанного активированного угля, проблема утилизации которых остаётся острой. С экономической точки зрения характерны высокие эксплуатационные затраты, связанные с постоянным расходом реагентов, заменой или регенерацией материалов, а также энергоёмкостью процессов. Кроме того, эффективность этих методов критически зависит от колебаний pH и солевого состава воды, что требует сложных систем контроля и управления.

Таким образом, совокупность указанных ограничений - недостаточная эффективность в отношении специфических загрязнений, образование вторичных отходов, высокие эксплуатационные расходы и зависимость от условий процесса – стимулирует активный поиск и развитие более совершенных химико-технологических подходов к очистке воды.

Современные вызовы, связанные с загрязнением водных ресурсов токсичными тяжелыми металлами, стимулировали развитие целого ряда перспективных методов, преодолевающих ограничения традиционных технологий. Эти подходы направлены на достижение высокой эффективности, селективности, экономической целесообразности и минимизацию вторичных отходов.

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений является адсорбция на новых материалах. Классический активированный уголь постепенно уступает место высокоэффективным сорбентам. Например, биосорбенты на основе хитина, хитозана, лигнина или биомассы водорослей предлагают экономически выгодное и возобновляемое решение благодаря использованию отходов агропромышленного комплекса. Настоящий

прорыв связан с применением наноразмерных адсорбентов, таких как наночастицы оксидов железа, титана и циркония, а также углеродных наноматериалов (графен, углеродные нанотрубки). Их уникальная эффективность обусловлена чрезвычайно высокой удельной поверхностью и большим количеством активных центров для связывания ионов металлов. Наиболее селективными и настраиваемыми материалами считаются металлоорганические каркасы (MOF), чья пористая структура может быть целенаправленно спроектирована для захвата конкретных ионов, например, свинца или мышьяка.

Значительный прогресс наблюдается и в области мембранных технологий. Модернизированные процессы нанофильтрации (NF) и обратного осмоса (RO), оснащенные новыми композитными и керамическими мембранами, демонстрируют повышенную селективность и устойчивость к засорению, обеспечивая глубокое удаление ионов металлов. Перспективной альтернативой для концентрации и извлечения металлов является мембранный дистилляция, которая использует низкопотенциальное тепло для разделения потоков через гидрофобную мембрану [4].

Электрохимические методы также занимают свою нишу в арсенале перспективных технологий. Электрокоагуляция, где коагулянт генерируется «на месте» за счет анодного растворения алюминиевых или железных пластин, обеспечивает эффективное удаление взвешенных и коллоидных форм металлов. Более того, метод электродного осаждения позволяет не просто удалять, а целенаправленно извлекать ценные металлы (такие как медь, никель или кадмий) в металлической форме на поверхности катода, что соответствует принципам циркулярной экономики.

Наконец, биотехнологические подходы, такие как биовосстановление, используют способность специфических штаммов бактерий трансформировать высокотоксичные формы металлов в менее опасные. Ярким примером является биоредукция высокотоксичного шестивалентного хрома (Cr(VI)) в значительно менее токсичный и подвижный трехвалентный хром (Cr(III)).

В целом, тренд заключается не только в совершенствовании отдельных методов, но и в создании гибридных технологий, комбинирующих, например, предварительную сорбцию или электрохимическую обработку с последующей мембранный фильтрацией для достижения максимального эффекта и снижения эксплуатационных затрат. Именно такие интегрированные решения определяют будущее в области очистки воды от тяжелых металлов.

Переход от традиционных методов очистки воды к перспективным обусловлен рядом фундаментальных преимуществ последних, которые решают ключевые проблемы, присущие классическим технологиям. В отличие от коагуляции, сорбции на активированном угле или биологической очистки, которые часто демонстрируют ограниченную эффективность в отношении новых классов загрязнений, современные подходы предлагают качественно иной уровень контроля над процессом.

Главным преимуществом является кардинально возросшая эффективность и селективность. Традиционные методы, такие как коагуляция, эффективны для

удаления взвешенных частиц, но не справляются с растворенными микропримесями — ионами тяжелых металлов или полярными органическими молекулами. В то же время перспективные методы, такие как адсорбция на металлоорганических каркасах (MOF) или молекулярно-импринтированных полимерах, обладают способностью к целенаправленному захвату специфических загрязнителей даже в сверхнизких концентрациях, что недостижимо для неселективного активированного угля. А продвинутые окислительные процессы (AOPs) способны не просто концентрировать, а полностью разрушать стойкие органические загрязнители, такие как пестициды или фармацевтические препараты, до безвредных CO₂ и H₂O, в то время как традиционная биологическая очистка часто бессильна против них.

Существенным прорывом стало снижение объемов вторичных отходов. Традиционная коагуляция генерирует большие объемы шлама, а насыщенный активированный уголь требует утилизации как опасные отходы. Перспективные методы минимизируют эту проблему. Многие современные адсорбенты, включая некоторые MOF и наноматериалы, демонстрируют потенциал к многократной регенерации и повторному использованию. Электрохимические методы, такие как электрокоагуляция, позволяют более точно дозировать реагенты, генерируя их «на месте», что снижает образование избыточного шлама [5]. Фотокаталитическое окисление и вовсе не производит твердых отходов, приводя к полной минерализации загрязнений.

С точки зрения эксплуатации, современные методы предлагают большую гибкость и управляемость. Их эффективность в меньшей степени зависит от колебаний pH, температуры и солевого состава воды, которые являются критическими проблемами для ионообменных смол и биологических систем. Кроме того, такие технологии, как мембранный дистилляция или электрохимическое окисление, легко поддаются автоматизации и могут быть интегрированы в компактные модульные установки. Это открывает возможности для создания децентрализованных систем очистки, что особенно актуально для удаленных или малых объектов.

Наконец, одним из важнейших конкурентных преимуществ является ресурсосбережение и соответствие принципам циркулярной экономики. В отличие от линейной модели «использовал-утилизировал», присущей традиционным методам, перспективные подходы позволяют извлекать и возвращать в производственный цикл ценные компоненты, например, тяжелые металлы, с помощью электродного осаждения. Использование биосорбентов на основе отходов агропромышленного комплекса не только решает проблему утилизации этих отходов, но и создает добавленную стоимость, сокращая зависимость от импортных реагентов.

Список литературы:

1. «Перспективы развития биохимической очистки промышленных сточных вод от сульфатов и ионов тяжелых металлов»
<https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-biohimicheskoy-ochistki-promyshlennyh-stochnyh-vod-ot-sulfatov-i-ionov-tyazhelyh-metallov>

-
2. «ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ»
(Газетдинов, Р.Р. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ / Р. Р. Газетдинов, А. Ю. Саптиева, А. В. Каленский // Заметки ученого. — 2021. — № 7-2. — С. 52-55. — ISSN 2713-0142. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/320855>
3. «Существующие и перспективные методы очистки сточных вод»
https://studopedia.ru/9_108150_sushchestvuyushchie-i-perspektivnie-metodi-ochistki-stochnih-vod.html
4. «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ»
<https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoye-metody-ochistki-vody>
5. «Исследование сущности электрохимического процесса, как технологической составляющей очистки воды»
<https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-suschnosti-elektrohimicheskogo-protsessa-kak-tehnologicheskoy-sostavlyayushey-ochistki-vody>

Аннотация: Данная статья посвящена анализу наиболее перспективных химико-технологических методов, направленных на глубокую очистку воды от тяжелых металлов и органических загрязнителей. В обзоре рассматриваются принципы действия, преимущества и ограничения таких подходов, как адсорбция на новых материалах (биосорбенты, наноматериалы, металлоорганические каркасы), мембранные технологии нового поколения (nanoфильтрация, обратный осмос, мембранный дистилляция), электрохимические методы (электроагрегация, электродное осаждение) и биотехнологические подходы. Особое внимание уделено критическому анализу преимуществ перспективных методов перед традиционными.

Ключевые слова: загрязнение водных ресурсов, традиционные методы очистки, коагулация и флокуляция, адсорбция, ионообмен.