

природ. ресурсов и охраны окруж. среды Респ. Беларусь от 30.10.2017 г. № 10-Т. – Минск: Минприроды, 2017. – 68 с.

5. Пирогов, А. Ю. Технологии очистки сточных вод для индивидуальных домов / А. Ю. Пирогов // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2022. – № 5 (233). – С. 52–59.

6. Веремеюк, О. И. Особенности эксплуатации локальных очистных сооружений в условиях Беларуси / О. И. Веремеюк, С. А. Качан // Природные ресурсы. – 2023. – № 1. – С. 112–120.

7. Желдаков, В. Н. Автономные системы канализации: выбор, монтаж, эксплуатация / В. Н. Желдаков. – Москва : АСТ ; Минск : Харвест, 2021. – 160 с.

8. Иванов, В. Л. Экологическая безопасность систем автономного водоотведения / В. Л. Иванов // Экологический вестник. – 2020. – № 3. – С. 45–51.

УДК 628.16

Эффективность применения различных методов обезжелезивания воды

Шорец Е.Д., Хандрико Н.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель Грузинова В.Л., к.т.н., доцент

В статье описаны различные методы очистки воды от железа. Рассматриваются особенности каждой технологии, рекомендации по их использованию и эффективность в обеспечении требуемого качества воды.

Удаление из воды железа – без преувеличений одна из самых сложных задач в водоочистке. Даже беглый обзор существующих способов удаления железа позволяет сделать обоснованный вывод о том, что на данный момент не существует универсального, экономически оправданного метода, применимого во всех случаях [1, 2]. Для каждого объекта водоснабжения необходим индивидуальный подбор технологической схемы и оборудования для обезжелезивания воды. Причиной такого подхода является, во-первых, то, что каждый метод имеет как достоинства, так и существенные недостатки. А во-вторых, на различных объектах водоснабжения качество воды отличается не только по количественному содержанию железа, но и по формам нахождения ионов железа в воде:

растворимая форма двухвалентного железа и нерастворимая форма трехвалентного железа.

При использовании безреагентных фильтрационных методов обезжелезивания в первую очередь должен решаться вопрос о выборе фильтрующей загрузки, а также должны рассматриваться основные технологические параметры процесса обезжелезивания (скорость фильтрации, высота слоя загрузки, метод регенерации загрузки, интенсивность промывки и длительность фильтроцикла) [3].

К важнейшим технологическим параметрам, определяющим величину капитальных затрат, следует отнести скорость фильтрации, высоту слоя загрузки и методы ее утилизации. Определению рациональных величин этих параметров и уделяется особое внимание.

Под верхней границей рациональной скорости фильтрации понимается та максимальная нагрузка на фильтр, отнесенная к его площади, которая обеспечивает при заданной высоте слоя загрузки предельно допустимую остаточную концентрацию железа ($0,3 \text{ мг/дм}^3$) в фильтрате.

Нижняя граница рациональной скорости фильтрации обуславливается скоростью окисления закисного железа в свободном объеме. Эта величина, при которой окисление железа происходит не в сорбционном слое на границе раздела фаз, а в массе воды, что приводит к выносу тонкодисперсного коллоида гидроокиси железа в фильтрате. Как правило, эти скорости очень низки и не принимаются во внимание.

Если, исходя из конструктивных или иных соображений, нельзя задаться высотой слоя фильтрующей загрузки, то рациональные величины скорости фильтрации и высоту слоя загрузки целесообразно определять, используя методы факторного эксперимента при проведении пробного обезжелезивания.

Интенсивность промывки определяется исходя из нормативных величин расширения загрузки с учетом полноты ее отмывки от скопившихся за период фильтроцикла загрязнений. При не расширяющейся загрузке используется только вторая предпосылка.

Удаление осадка из фильтрующей загрузки достигается промывкой ее обратным током воды и, при необходимости, продувкой воздухом.

Продолжительность фильтроцикла определяется ухудшением качества профильтрованной воды или предельно допустимой величиной потери напора при фильтровании. Величина фильтроцикла определяется экспериментально при проведении пробного обезжелезивания и уточняется, как и время зарядки фильтра в период пуско-наладочных работ.

При рассмотрении существующих методов обезжелезивания воды можно выделить основные, к которым относятся:

- окисление;

- каталитическое окисление;
- ионный обмен;
- мембранные методы;
- дистилляция.

Окисление является традиционным методом, применяемым уже много десятилетий. Так как реакция окисления железа занимает довольно длительный промежуток времени, то использование только воздуха требует больших резервуаров, в которых возможно обеспечить нужное время контакта. Добавление же специальных окислителей ускоряет процесс. Наиболее передовым и сильным окислителем на сегодняшний день является озон. Однако установки для его производства довольно сложны, дороги и требуют значительных затрат электроэнергии, что ограничивает его применение. Необходимо отметить также, что в концентрированном виде (например, на точке ввода в воду) озон является ядом (как, собственно говоря, и многие другие окислители) и требует очень внимательного к себе отношения [4. 5].

Каталитическое окисление с последующей фильтрацией - наиболее распространенный на сегодняшний день метод удаления железа, применяемый в высокопроизводительных, локальных очистных системах. Суть метода заключается в том, что реакция окисления железа происходит на поверхности гранул специальной фильтрующей среды, обладающей свойствами катализатора (ускорителя химической реакции окисления) [5, 6].

Наибольшее распространение в современной водоподготовке нашли фильтрующие среды на основе диоксида марганца (MnO_2). Эти фильтрующие "загрузки" отличаются между собой как своими физическими характеристиками, так и содержанием диоксида марганца и поэтому эффективно работают в разных диапазонах значений характеризующих воду параметров. Однако принцип их работы одинаков. Железо (и в меньшей степени марганец) в присутствии диоксида марганца быстро окисляется и оседает на поверхности гранул фильтрующей среды. Впоследствии большая часть окисленного железа вымывается в дренаж при обратной промывке. Таким образом, слой гранулированного катализатора является одновременно и фильтрующей средой.

Для улучшения процесса окисления в воду могут добавляться дополнительные химические окислители. Наиболее распространенным является перманганат калия, так как его применение не только активизирует реакцию окисления, но и компенсирует "вымывание" марганца с поверхности гранул фильтрующей среды, то есть регенерирует ее. Используют как периодическую, так и непрерывную регенерацию.

Все системы на основе каталитического окисления с помощью диоксида марганца, кроме специфических, имеют и ряд общих недостатков.

Во-первых, они неэффективны в отношении органического железа. Более того, при наличии в воде любой из форм органического железа, на поверхности гранул фильтрующего материала со временем образуется органическая пленка, изолирующая катализатор (диоксид марганца) от воды. Таким образом, вся каталитическая способность фильтрующей засыпки сводится к нулю. Практически "на нет" сводится и способность фильтрующей среды удалять железо, так как в фильтрах этого типа просто не хватает времени для естественного протекания реакции окисления.

Во-вторых, системы этого типа не могут справиться со случаями, когда содержание железа в воде превышает $10\text{--}15\text{ мг/дм}^3$, что совсем не редкость. Присутствие в воде марганца только усугубляет ситуацию [7].

Ионный обмен как метод обработки воды известен довольно давно и применяется в основном для умягчения воды. Раньше для реализации этого метода использовались природные иониты (сульфоугли, цеолиты). Однако с появлением синтетических ионообменных смол эффективность использования ионного обмена для целей водоочистки резко возросла.

С точки зрения удаления из воды железа важен тот факт, что катиониты способны удалять из воды не только ионы кальция и магния, но и другие двухвалентные металлы, а значит и растворенное двухвалентное железо. Причем теоретически, концентрации железа, с которыми могут справиться ионообменные смолы, очень велики. Достоинством ионного обмена является также и то, что он "не боится" спутника железа – марганца, сильно осложняющего работу систем, основанных на использовании методов окисления. Главное же преимущество ионного обмена состоит в том, что из воды могут быть удалены железо и марганец, находящиеся в растворенном состоянии. То есть совсем отпадает необходимость в такой капризной и "грязной" (из-за необходимости вымывать ржавчину) стадии, как окисление.

Однако на практике, возможность применения катионообменных смол по железу сильно затруднена. Объясняется это следующими причинами:

- во-первых, применение катионитов целесообразно там, где существует также и проблема с жесткостью воды, так как железо удаляется из воды вместе с жесткостью. Там, где ситуация с жесткостью достаточно благополучная, применение катионообменных смол нерационально;

- во-вторых, ионообменные смолы очень критичны к наличию в воде трехвалентного железа, которое "забивает" смолу и очень плохо из нее вымывается. Именно поэтому нежелательно наличие в воде не только уже окисленного железа, но и растворенного кислорода и других окислителей, наличие которых может привести к его образованию. Этот фактор

накладывает также ограничение и на диапазон pH, в котором работа смол эффективна;

- в-третьих, при высокой концентрации в воде железа, с одной стороны возрастает вероятность образования нерастворимого трехвалентного железа (со всеми вытекающими отрицательными последствиями - см. выше) и, с другой стороны, гораздо быстрее истощается ионообменная ёмкость смолы. Оба этих фактора требуют более частой регенерации, что приводит к увеличению расхода соли;

- в-четвертых, наличие в воде органических веществ (в том числе и органического железа) может привести к быстрому "зарастанию" смолы органической пленкой, которая одновременно служит питательной средой для бактерий.

Тем не менее, именно применение ионообменных смол представляется наиболее перспективным направлением в деле борьбы с железом и марганцем в воде. Задача заключается в том, чтобы подобрать такую комбинацию ионообменных смол (иногда весьма сложную и многокомпонентную), которая была бы эффективна в достаточно широких пределах параметров качества воды.

Мембранные технологии достаточно широко используются в водоподготовке, однако удаление железа отнюдь не главное их предназначение, скорее побочный эффект. Этим и объясняется тот факт, что применение мембран пока не входит в число стандартных методов борьбы с присутствием в воде железа. Основное назначение мембранных систем – удаление бактерий, простейших и вирусов ("холодная стерилизация"), частичное или глубокое обессоливание, подготовка высококачественной питьевой воды. То есть они предназначены для глубокой доочистки воды.

Тем не менее, микрофильтрационные мембраны пригодны для удаления уже окисленного трехвалентного железа, ультрафильтрационные и нанофильтрационные мембраны также способны удалять коллоидное и бактериальное железо, а обратноосмотические мембраны удаляют даже растворенное органическое и неорганическое железо (и марганец, кстати, тоже).

Практическое же применение мембран для работы по железу ограничено следующими факторами:

- во-первых, мембраны даже в большей степени, чем гранулированные фильтрующие среды и ионообменные смолы, критичны к "зарастанию" органикой и забиванию поверхности нерастворимыми частицами (в данном случае ржавчиной). Это означает, что мембранные системы требуют достаточно тщательной предварительной подготовки воды, в частности – удаления взвесей и органики. То есть мембранные системы применимы либо там, где нет органического, коллоидного, бактериального и

трехвалентного железа, либо проблема с этими загрязнениями должна быть предварительно решена другими методами;

– во-вторых, мембранные системы весьма и весьма недешевы. Их применение рентабельно только там, где требуется очень высокое качество воды (например, в пищевой промышленности).

Дистилляция является давно известным и проверенным способом глубокой очистки воды. Принцип дистилляции фактически повторяет круговорот воды в природе.

Вода, испаряясь, освобождается практически ото всех растворенных и нерастворенных примесей. В дистилляторах для ускорения естественного процесса испарения воды применяется нагревание (в подавляющем большинстве случаев с помощью электричества) воды до температуры кипения, что приводит к интенсивному образованию пара. При этом механические частицы, содержащиеся в воде (включая бактерии, вирусы и прочие микроорганизмы, а также коллоиды и взвешенные частицы) оказываются слишком тяжелыми, чтобы быть подхваченными паром. Одновременно почти все растворенные в воде химические вещества (включая соли железа, других тяжелых металлов, соли жесткости и т.д.) достигают предела своей растворимости (за счет повышенной температуры и особенно увеличения концентрации – вода постоянно улетучивается) и выпадают в осадок. Таким образом, вместе с паром могут "уйти" только летучие органические соединения (среди которых, правда и такие опасные, как тригалометан – потенциальный канцероген – и другие). Именно поэтому в дистилляторах часто устанавливают фильтр доочистки на основе активированного угля.

В дальнейшем пар, охлаждаясь (в природе – в верхних слоях атмосферы, в дистилляторах – в специальных конденсаторах, простейшим из которых является змеевик), конденсируется, опять превращаясь в воду. Этот конденсат и является той высокоочищенной водой, которую называют дистиллятом. Иногда дистиллированную воду "прогоняют" через дистиллятор еще раз и получают так называемый би-дистиллят.

Дистиллированную воду достаточно широко используют в промышленности, медицине, в химических лабораториях. Хорошо всем известный пример использования дистиллированной воды – заливка в аккумуляторы автомобиля. В системах же водоснабжения дистилляторы не нашли широкого применения.

Ограниченность применения дистилляторов в настоящее время объясняется следующими причинами:

- 1) дистилляторы имеют малую производительность;
- 2) в бойлере дистиллятора постоянно образуются осадок, накипь и т.п., которые надо вычищать;

3) дистилляторы излучают тепло и в довольно значительных количествах;

4) дистилляторы потребляют значительное количество электроэнергии, что для многих делает их использование менее рентабельным, чем обратный осмос или деминерализация на ионообменных смолах.

Как отмечалось выше, для удаления железа из подземных вод после окисления кислородом или воздухом широко используются различные фильтрующие загрузки: кварцевые пески, дробленый и недробленый керамзит, колотый гранитный щебень, антрацит, шлаки и др. [8].

Анализ имеющихся литературных данных показывает, что возможности улучшения свойств сорбентов для извлечения железа из подземных и поверхностных вод практически исчерпаны. Поэтому был поставлен вопрос о поиске новых высокоэффективных материалов с активной фильтрующей поверхностью.

С этой точки зрения рационален переход на активные фильтрующие материалы, позволяющие не только отделять соединения железа, как механические примеси (частицы гидроксида железа), но и путем активного химического взаимодействия материала загрузки с растворенными формами (ионами) железа образовывать труднорастворимые соединения. В этой связи обращают на себя внимание синтетические и природные силикатные и карбонатные материалы, которые могут избирательно сорбировать из сильно минерализованных растворов ионы цветных и тяжелых металлов.

В этой связи были проведены исследования по определению эффективности использования в качестве фильтрующих загрузок материала на основе силикатного песка и извести, подвергнутого термopаровой обработке, и гранулированного карбонатовосдерживающего трепела месторождения «Стальное» Могилевской области. По химическому составу основными компонентами трепела являются оксиды кремния, кальция и алюминия. Отличительной особенностью белорусских трепелов является высокое содержание в их составе карбона кальция. Данные материалы разрешены Минздравом РБ для применения в качестве фильтрующих загрузок в хозяйственно - питьевом водоснабжении [8].

Вывод: выбор подходящего метода очистки воды от железа играет решающую роль в обеспечении её качества и безопасности. Правильное определение оптимальной технологии с учетом конкретных условий и характеристик воды позволяет эффективно избавляться от загрязнений и предотвращать возможные негативные последствия для здоровья. Учитывая особенности воды и требования к конечному продукту, подбор наиболее подходящего метода является ключевым этапом в системе водоочистки.

Литература

1. Калинина Н. В. Взаимодействие воды, кислотных и щелочных растворов со свинцовосиликатными и боратно-бариевым стеклами: автореферат диссертации ... кандидата физико-математических наук : 01.04.07 Физика конденсированного состояния. – Нальчик, 2007. – 18 с.
2. Водоподготовка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/396860/>. – Дата доступа: 29.11.25.
3. Гидрогеохимические особенности участка «Лельчицы» Лельчицкого района Гомельской области в связи с организацией водоснабжения г.п. Лельчицы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vunivere.ru/work38360/page10>. – Дата доступа: 28.11.25.
4. Соединения железа в воде [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anchem.ru/FORUM/read.asp?id=7099>. – Дата доступа: 28.11.25.
5. Иванова И. С. Железосодержащие подземные воды юго-восточной части среднеобского бассейна: диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.07. Гидрогеология / Иванова И.С. – Томск, 2013. – 22 с.
6. Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС и АЭС : учебно-методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции», 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций» / В. А. Чиж [и др.]. – Минск : БНТУ, 2015. – 105 с.
7. Кюберис Э.А. Технология очистки подземных вод с высоким содержанием железа и марганца на малогабаритных установках : автореферат диссертации ... кандидата технических наук : 05.23.04 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных объектов / Кюберис Э.А. – Самара, 2010. – 20 с.
8. Гуринович А.Д. Повышение эффективности систем централизованного питьевого водоснабжения из подземных источников: автореферат диссертации на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук: 05.23.04 - Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных объектов / Гуринович А.Д. – Минск, 2001. – 45 с.