

**ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ И ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ВОДЫ**  
**методом усиленной аэрации**  
**в струйных декарбонизаторах-обезжелезивателях «КВАРК»**

**Введение**

Обезжелезивание поверхностных и подземных вод является важной неотъемлемой стадией водоподготовки питательной и подпиточной воды энергетических объектов, а также водопроводной питьевой воды хозяйственно-бытового назначения.

Присутствие железа в воде значительно ухудшает ее органолептические показатели, вода приобретает окраску, мутнеет и становится непригодной для бытовых нужд.

Железо, содержащееся в воде, не усваивается организмом и является для него токсичным загрязнителем, оказывающим раздражающее действие на слизистые оболочки и кожу, вызывающим аллергические реакции и стимулирующим развитие гемохроматоза. Поэтому использование железистых вод для хозяйственно-питьевых нужд населения возможно только после очистки воды от компонентов железа, содержание которых превышает установленные нормы.

Согласно ГОСТ 2874-82 "Вода питьевая" и санитарным нормам СанПиН 2.1.4.1074-01 содержание железа в питьевой воде не должно превышать 0,3 мг/л. Это соответствует рекомендациям Всемирной организации здравоохранения, стандартам США и некоторых других стран. Несколько более жесткие нормы (0,2 мг/л) приняты в ЕЭС.

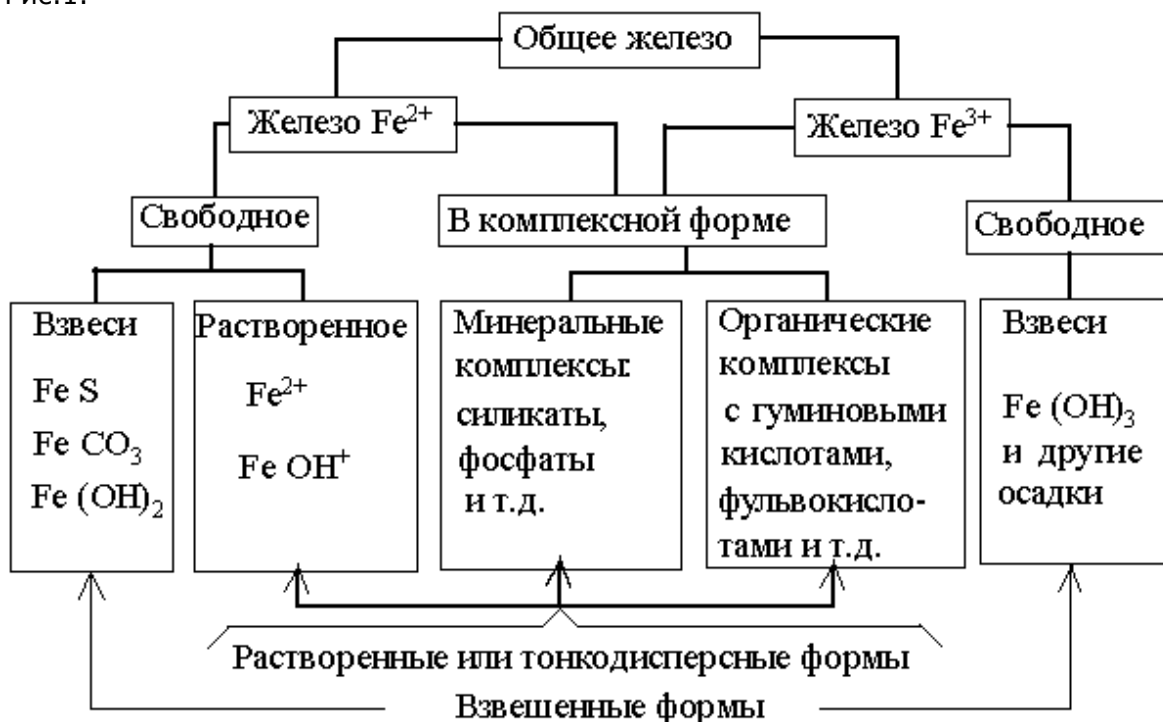
При транспортировании железосодержащих вод ускоряются процессы коррозии металлических труб, при питании такой водой котлов, парогенераторов и технологического оборудования образуются накипные отложения, нарушается водно-химический и тепловой режим.

Нормы содержания железа в технической воде для различных отраслей промышленности гораздо жестче, чем для аналогичные нормы для питьевой воды.

Так, для энергетики, в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ» (РД 34.20.501-95) содержание соединений железа должно быть: для котлов с естественной циркуляцией от 0,02 до 0,1 мкг/дм<sup>3</sup> в зависимости от рабочего давления в котле и вида топлива, а для прямоточных котлов – не более 0,01 мкг/дм<sup>3</sup>.

В зависимости от источника и степени воздействия внешних факторов, железо в воде может находиться в двух формах окисления ( $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ ) и множестве комплексных форм. Варианты форм железа и его соединений в воде представлены на рис. 1.

Рис.1.



Поверхностные воды практически не меняют своего состава при их транспортировании. Железо в поверхностных водах большей частью уже окислено до трехвалентного нерастворимого состояния и, кроме того, входит в состав органических комплексов и железобактерий.

В подземных артезианских водах растворенное двухвалентное железо присутствует в основном в виде ионов  $Fe^{2+}$ . Удаление именно этого железа является основной задачей установок обезжелезивания в системах водоподготовки.

### Традиционные способы обезжелезивания

В общем случае в присутствии окислителя и достаточной щелочности двухвалентное железо окисляется, его органические формы разрушаются и происходит гидролиз с образованием взвеси гидрооксида  $Fe(OH)_3$ .

Окисление двухвалентного железа происходит при обмене электрона по следующей схеме:



Для окисления железа по реакции (1.1.) необходим кислород в количестве 0,143 мг на 1 мг  $Fe^{2+}$ .

В присутствии ионов воды реакция окисления железа имеет вид:



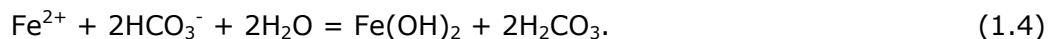
Концентрация ионов водорода  $H^{+}$  оценивается значением pH воды, а активность электронов значением окислительно-восстановительного потенциала Eh.

При подъеме подземных вод на поверхность нарушаются равновесные состояния растворенных веществ, из воды начинает выделяться двуокись углерода  $CO_2$  и поглощаться кислород воздуха.

В результате начинается распад бикарбонатов и выделение растворенной двуокиси углерода, что приводит к повышению pH воды.



Повышение pH при наличии кислорода приводит к процессу окисления железа и гидролизу с образованием гидрата закиси:

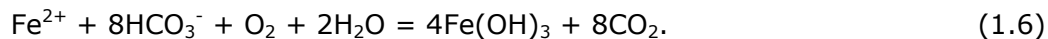


При введении в подземную воду окислителя, гидрозакись железа превращается в гидроокись:



В результате гидролиза содержание свободной углекислоты в обрабатываемой воде увеличивается на 1,6 мг, а щелочность уменьшается на 0,036 мг-экв/л.

Суммарно реакции (1.4) и (1.5) могут быть записаны в следующем виде:



В зависимости от конкретных условий реакции, окисление  $Fe^{2+}$  может предшествовать гидролизу или идти параллельно с ним, но независимо от того, в какой последовательности протекают реакции окисления и гидролиза, конечным их продуктом всегда является гидроокись железа.

В итоге в воде образуются бурые нерастворимые хлопья гидроксидов, которые придают ей интенсивную окраску.

Технологический процесс обезжелезивания завершается удалением продукта реакции - нерастворимого гидроксида железа: отстаиванием, отстаиванием с коагуляцией и (или) фильтрацией на скорых либо напорных фильтрах.

В таблице 1 приведены основные методы обезжелезивания, в настоящее время применяющиеся в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве РФ.

Табл.1  
Основные методы обезжелезивания воды

№	Метод	Мах конц. Fe <sup>2+</sup> , мг/л	pH	Преимущества	Недостатки
1.	Озонирование	10	6,8-8,5	Высокая эффективность Возможность удаления органического Fe Возможность удаления Mn	Высокая стоимость Высокие энергозатраты Коррозионная активность Токсичность
2.	Хлорирование	5	6,8-8,5	Одновременная дезинфекция воды	Сложность технологии Токсичность
3.	Каталитическое окисление с фильтрацией	10	6,2-8,5	Эффективность Экономичность	Необходимость предварительной аэрации Истирание засыпки Низкая эффективность удаления органического Fe
4.	Промышленное осаждение	5	6,8-8,0	Большая производительность Экономичность	Медленная скорость процесса Необходимость применения коагулянтов Низкая эффективность удаления органического Fe
5.	Ионный обмен	50	5,0-7,0	Высокая степень очистки Одновременное умягчение воды	Заращение катионита Невозможность удаления Fe <sup>3+</sup>
6.	Мембранная фильтрация	0,5	6,8-7,5	Высокая степень очистки Возможность удаления коллоидного и бактериального Fe	Невысокая исходная концентрация Fe Высокая стоимость Быстрое зарастание и засорение мембран
7.	Биологическое обезжелезивание	50	6,0-7,5	Одновременное удаление сероводорода	Требуется дальнейшая сорбционная очистка и обеззараживание
8.	Упрощенная аэрация	5	6,0-9,0	Большая производительность Экономичность	Низкая эффективность удаления органического Fe
9.	Принудительная аэрация	10	6,8-8,5	Большая производительность Экономичность	Низкая эффективность удаления органического Fe
10.	Усиленная аэрация в обезжелезивателе «КВАРК»	100	4,0-9,0	Большая производительность Экономичность Высокая исходная концентрация Fe Широкий диапазон pH Одновременное удаление избыточного CO <sub>2</sub>	Низкая эффективность удаления органического Fe

*Озонирование* – это интенсивное окисление двухвалентного железа с помощью добавления в воду газообразного озона и последующей ее фильтрацией.

*Хлорирование* – окисление и последующая фильтрация двухвалентного железа путем добавления в воду продуктов хлора и его соединений (диоксида хлора, гипохлорита натрия, гипохлорита кальция и др.)

*Каталитическое окисление с фильтрацией* основано на пропускании предварительно аэрированной воды через резервуар со специальной фильтрующей засыпкой с каталитическими свойствами.

*Промышленное осаждение коллоидного железа* - это удаление коллоидных частиц гидроксида трехвалентного железа путем отстаивания с добавлением флокулянтов и коагулянтов и последующей фильтрацией.

*Ионообменный метод удаления железа* подразумевает использование катионитов для удаления из воды растворенного двухвалентного железа.

*Мембранные методы обезжелезивания* применяются для удаления растворенного в воде двухвалентного железа, коллоидных частиц гидроксида Fe<sup>3+</sup>, коллоидного и бактериального органического железа с помощью фильтрации через мембрану.

*Биологическое обезжелезивание* подразумевает использование железобактерий, окисляющих двухвалентное растворенное железо в трехвалентное и последующее удаление коллоидной взвеси и бактериальной пленки в отстойнике и на фильтрах.

На выбор метода окисления непосредственно влияет стабильность соединений железа. Данная стабильность зависит от состава воды, в котором pH и щелочность являются главными факторами. Данные факторы не связаны напрямую: pH является математическим выражением концентрации ионов водорода, а значение щелочности относится к способности нейтрализовывать кислотные соединения.

При низких значениях щелочности и pH растворенное железо  $Fe^{2+}$  стабильно и проблема обезжелезивания может быть легко решена с помощью ионного обмена в катионитовых фильтрах.

Однако в подавляющем большинстве случаев в воде присутствует нестабильное железо, и ионный обмен необходимо заменять осадительной фильтрацией.

При этом окисление и осаждение являются различными процессами, протекающими с разными скоростями, но зависящими от pH и щелочности воды. Растворенное железо может быть полностью окислено, но не будет осаждаться при недостаточной щелочности воды. Экспериментально установлено, что при прочих равных условиях скорость окисления железа  $Fe^{2+}$  кислородом воздуха при возрастании показателя pH на 1,0 возрастает почти в 100 раз.

Самый простой и экономичный способ обезжелезивания воды – это аэрация, окисление растворенного железа бесплатным природным окислителем: кислородом воздуха.

*Упрощенная аэрация* заключается в отфильтровывании нерастворимых соединений  $Fe^{3+}$  после ее контакта с воздухом, осуществляемом в результате свободного излива с высоты либо разбрызгивания в аэрационном бассейне.

*Принудительная аэрация* состоит в фильтрации воды после введения в нее расчетного количества воздуха с помощью эжектора либо компрессора.

Для принудительной аэрации компанией «КВАРК» выпускается модельный ряд струйных эжекторов-аэраторов производительностью от 0,1 до 300 м<sup>3</sup>/ч, обладающих повышенным коэффициентом эжекции, экономичностью и увеличенным сроком службы по сравнению с существующими аналогами.

Как видно из Таблицы 1, каждый из методов обезжелезивания воды применим только в определенных случаях, у каждого есть и достоинства, и существенные недостатки. Выбор конкретного метода удаления железа (или их комбинации) в большой степени зависит от исходного содержания и формы растворенного железа, температуры, щелочности и pH обрабатываемой воды, требуемой производительности установки и конкретных условий ее эксплуатации.

На сегодняшний день отсутствует единая утвержденная методика определения органического, коллоидного и бактериального железа. Также не существует универсального способа обезжелезивания, охватывающего все варианты сочетания исходных параметров и имеющего низкую эксплуатационную стоимость.

Однако для подавляющего большинства подземных вод, химический состав которых характеризуется содержанием  $Fe^{2+}$  свыше 10 мг/л, низким содержанием органического железа и низкой стабильностью соединений железа, компанией «КВАРК» разработан способ, позволяющий экономично и в широком диапазоне параметров производить промышленное обезжелезивание воды.

### **Обезжелезивание методом усиленной аэрации**

Вследствие невысокого окислительного потенциала воздуха, для окисления железа путем аэрации требуется время, которое в общем случае зависит от исходного содержания  $Fe^{2+}$ . Так, при концентрации железа 5 мг/л окисление произойдет примерно за 15-30 минут. Полное окисление железа вообще невозможно, так как оно может быть осуществлено при контакте воды с воздухом лишь в течение бесконечного времени. Это ограничение связано с конечной скоростью диффузии воздуха в воде, а также достижением в процессе окисления стабильного состояния растворенных форм железа. Очевидно, что на практике способ упрощенной и принудительной аэрации не применим для воды с исходным содержанием железа свыше 10 мг/л.

Однако на скорость окисления влияет еще один важный фактор – относительная поверхность взаимодействия водяной и воздушной фаз, которая, с одной стороны, влияет на время диффузии растворенного кислорода воздуха к молекулам железа, а с другой стороны, позволяет обеспечить избыток воздуха, необходимый для окисления всего количества двухвалентного железа до требуемой нормы.

Так, при взаимодействии 1 м<sup>3</sup> воды с воздухом лишь через ее зеркало (поверхность), относительная поверхность раздела фаз составляет всего 1-5 м<sup>2</sup>.

При изливе 1 м<sup>3</sup> через воронку при упрощенной аэрации, относительная поверхность раздела фаз составит уже 30-40 м<sup>2</sup>.

Относительная поверхность раздела фаз при эжекции воздуха в газодинамическом аэраторе или эжекторе в процессе принудительной аэрации будет соответствовать пленочному течению по насадочному материалу при толщине пленки 1 мм (хордовая насадка, кольца Рашига, полимерная призма и т.п.) и составит 550 м<sup>2</sup>.

В струйном декарбонизаторе-обезжелезивателе «КВАРК» в процессе *усиленной аэрации* при давлении воды на входе 0,2-0,3 МПа и характерном размере капли 0,25 мм относительная поверхность взаимодействия 1 м<sup>3</sup> воды и воздуха составляет 13350 м<sup>2</sup>.

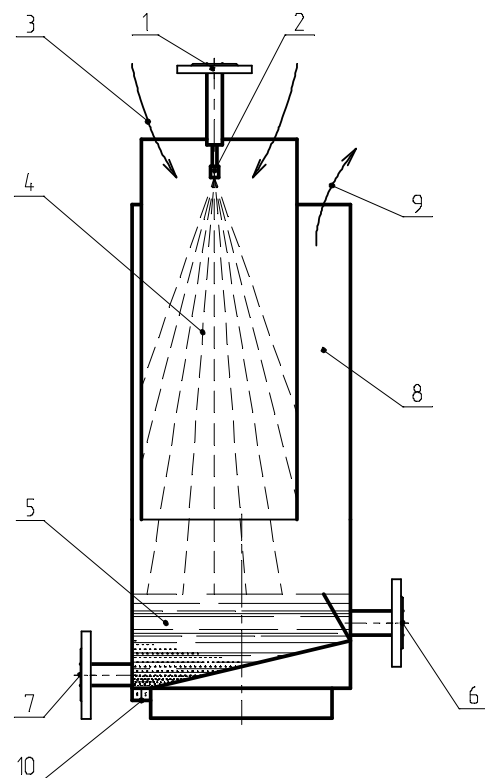
Данная величина поверхности обеспечивается мелкодисперсным распылом воды в рабочей зоне аппарата через цельнофакельные струйно-центробежные форсунки.

Принципиальная конструкция обезжелезивателя «КВАРК» показана на рис.2.

Обрабатываемая вода подводится по коллектору на форсуночный узел, состоящий из расчетного числа форсунок, распределяется равномерно по форсункам и под действием перепада давления распыливается в кольцевой или щелевой рабочей зоне. Распыливаемая вода эжектирует воздух, который поступает через окна входа воздуха в количестве, стехиометрически необходимом для окисления содержащегося в воде железа.

В рабочей зоне за счет контакта распыленной воды с эжектированным воздухом происходит процесс десорбции углекислоты, растворенной в воде, в результате ее гидролиза, повышается pH воды, обеспечивая высокую скорость окисления железа Fe<sup>2+</sup> кислородом воздуха.

Рис.2



1. Подвод обрабатываемой воды
2. Форсуночный узел.
3. Всас воздуха.
4. Рабочая зона.
5. Контактная зона.
6. Отвод обработанной воды.
7. Шламодвод периодической продувки.
8. Сепарационная зона.
9. Выход отработанного воздуха.
10. Магнитный коагулятор.

Конструкция цельнофакельных центробежно-струйных форсунок обеспечивает требуемую степень распыла, а расчетное соотношение площадей выходных сечений форсунок и рабочей зоны - необходимый коэффициент эжекции.

После выхода водо-воздушной смеси из рабочей зоны происходит разделение обработанной воды и воздуха, обработанная вода попадает в контактную зону, где происходит ее дальнейшее интенсивное окисление. Интенсификация окисления в контактной зоне связана с высокими каталитическими свойствами основного продукта реакции - нерастворимых хлопьев гидроксидов, которые являются для обрабатываемой воды своеобразной каталитической загрузкой. В условиях реальных объектов при модернизации систем водоподготовки в качестве контактной зоны рекомендуется использовать существующий бак-накопитель.

Для коагуляции взвеси, в нижней точке контактной зоны расположен постоянный магнит, благодаря которому большое количество осадка скапливается в районе патрубка шламоотвода. Удаление нерастворимых продуктов окисления производится путем периодической продувки в зависимости от исходной концентрации растворенного железа.

Для снижения особо высокой начальной концентрации  $Fe^{3+}$  (свыше 50 мг/л) применяется непрерывная продувка контактной зоны, шламоотвод оборудуется встроенным струйным насосом, а контактная зона – дополнительным аэратором.

Обработанная вода через перелив отводится из аппарата на дальнейшую фильтрацию, а отработанный воздух через сепарационную зону удаляется из обезжелезивателя в атмосферу.

Для исключения коррозии конструктивных элементов обезжелезивателя, аппарат выполняется полностью из нержавеющей стали.

Таким образом, совмещение в струйном декарбонизаторе-обезжелезивателе «КВАРК» процессов мелкодисперсного дробления воды, ее усиленной аэрации и принудительного контакта с осадком, обладающим каталитическими свойствами, позволяет проводить экономичное высокоэффективное обезжелезивание воды с такими начальными концентрациями растворенного железа, которые невозможно устранить традиционными способами.

### **Декарбонизация и удаление растворенных газов**

Процесс *декарбонизации* в рассматриваемом аппарате по своей физической сути проще обезжелезивания и основывается на повышенной кинетике десорбции растворенного избыточного диоксида углерода благодаря высокой относительной поверхности взаимодействия воды и воздуха. В отличие от обезжелезивания, атмосферный воздух при струйной декарбонизации выступает не как окислитель, а в качестве фазы с равновесным содержанием  $CO_2$ . Согласно закону Генри, концентрация растворенного газа пропорциональна парциальному давлению этого газа над поверхностью жидкости. При контакте с воздухом, избыточный диоксид углерода с высокой скоростью десорбируется из обрабатываемой воды, физика процесса при этом соответствует процессу десорбции воздуха в термических деаэраторах. (Подробнее о десорбции см. статью [«Целевые деаэраторы КВАРК – современный способ деаэрации жидкости»](#)).



Таким же образом, с помощью декарбонизаторов «КВАРК», работающих на методе усиленной аэрации, из воды легко удаляются сероводород, метан, радон, иные растворенные газы, удаление которых обычными способами экономически невыгодно и сопряжено со значительными техническими трудностями.

Рис.3

Декарбонизатор-обезжелезиватель «КВАРК» марки ДКС(Ж)-10 номинальной производительностью 10 м<sup>3</sup>/ч.

## Литература

1. Громогласов А.А., Копылов А.С., Пильщиков А.П. Водоподготовка: Процессы и аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1990г.
2. Кулаков В. В., Сошников Е. В., Чайковский Г. П., Обезжелезивание и деманганация подземных вод: Учебное пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 1998.
3. Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990г.
4. Мещеряков Н.Ф. Кондиционирующие и флотационные машины и аппараты. М.: Недра, 1990г.
5. Лифшиц О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. М.: Энергия, 1976г.
6. Физические величины. Справочник. Под редакцией Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991г.
7. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976г.
8. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Декарбонизаторы водоподготовительных установок систем теплоснабжения. М.: Изд-во АСВ, 2002г.
9. Патент на изобретение № 2151635 (RU). МПК В 01 F 5/04. Устройство для сатурации жидкости / Кувшинов О.М., Цыцаркин А.Ф. // Бюллетень изобретений №7, 2000г.