

Приложение 2

Водоподготовка некондиционных подземных вод перед подачей в водоразборные сети

Общие положения

Дегазация воды

Углекислота
Сероводород

Жёсткость

Фтор

Фторирование воды
Дефторирование воды

Железо

Очистка на наземных станциях обезжелезивания
Внутрипластовое обезжелезивание подземных вод

Марганец

Внутрипластовая деманганация подземных вод
Очистка вод на наземных станциях деманганации

Мышьяк

Стронций

Литература

Водоподготовка некондиционных подземных вод перед подачей в водоразборные сети

Общие положения

Подземная вода, предназначенная для хозяйственно-питьевых нужд, должна быть безвредна для здоровья человека, иметь хорошие органолептические показатели и быть пригодной для использования в быту. Основные показатели качества хозяйственно-питьевой воды регламентированы в документах:

- ГОСТ 2761-84 от 01.01.1989 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора»,
- СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества»,
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования" [4, 5, 17].

Подготовка подземной воды для хозяйственно-питьевых нужд представляет собой целый комплекс физических (дегазация, вымораживание, дистилляция, термическая обработка), химических (реагентные и адсорбционные методы, ионный обмен), электрохимических, биологических и комбинированных методов по обработке воды и изменению её первоначального некондиционного состава. Это достигается не только путём очистки воды от ряда нежелательных и вредных примесей, но и путём улучшения её природных свойств за счёт обогащения состава недостающими ингредиентами.

В целом все методы обработки воды делятся на следующие основные группы [22]:

1. улучшение органолептических свойств воды (осветление, обесцвечивание, дезодорация и др.);
2. обеспечение эпидемиологической безопасности (хлорирование, озонирование, ультрафиолетовая радиация и др.);
3. кондиционирование минерального состава (фторирование и обесфторивание, извлечение ионов тяжёлых металлов, обезжелезивание, деманганация, умягчение или обессоливание и др.)

Следует отметить, что очистка подземной воды для хозяйственно-питьевых нужд характеризуется большими затратами на строительство и эксплуатацию сооружений по очистке и водоподготовке, часто возникают проблемы с удалением или складированием



осадков и растворов, являющихся отходами процесса очистки воды. Поэтому широко развивается альтернативный метод – внутрислоевая очистка подземных вод (например, подземное обезжелезивание и деманганация).

Выбор метода обработки воды должен соответствовать рекомендациям [20] и основываться прежде всего на предварительном изучении её состава, а также на требованиях потребителя (количество воды, степень очистки и пр.), инженерно-геологических и экономических условиях, а также на основании данных технологических исследований и эксплуатации сооружений, работающих в аналогичных условиях.

Подземная вода, помимо собственно молекул воды (H_2O), содержит посторонние примеси, а именно:

1) *Живые микроорганизмы* – болезнетворные бактерии и вирусы. Водные бактериальные и вирусные инфекции могут вызвать заболевания брюшным тифом, дизентерией, холерой, туляремией, бруцеллёзом, инфекционной желтухой, полиомиелитом и др. болезнями [2].

Для оценки санитарного состояния питьевой воды используется коли-индекс и количество колоний бактерий при посеве на питательной среде, на которой прорастают в основном сапрофиты. Присутствие патогенных микроорганизмов в составе подземной воды характерно чаще всего для прибрежных водозаборов, восполнение запасов которых происходит главным образом из поверхностных водоёмов.

При низком коли-титре для устранения из воды микроорганизмов и вирусов проводится обеззараживание действием окислителей, ультрафиолетового или ионизирующего излучения, ультразвуковых колебаний, тепловой обработки и фильтрованием. Наиболее распространён метод воздействия окислителями (жидкий и газообразный хлор, хлорная известь, гипохлориды, двуокись хлора, озон, бактерицидные лампы и др.), диффундирующими внутрь клетки микроорганизма, затем вступающими в реакцию с веществом клетки и, наконец, отравляющими её [22].

2) *Взвешенные вещества* размером более 0,1 мкм представлены частицами песка, глины; содержание их в подземных водах незначительно. Следует отметить, что взвешенные вещества с течением времени способны к отстаиванию.

По количеству взвешенных веществ также определяют мутность воды, различают воду прозрачную, слабоопалесцирующую, опалесцирующую, слегка мутную, сильно мутную. Следует отметить, что железистые воды, получаемые из водозаборов, нередко



при окислении на воздухе бывают от опалесцирующих до мутных. Согласно [17], ПДК на мутность 1,5 мг/л.

В подземных водах обычно не наблюдается повышение цветности (ПДК до 20 (35) град [17]). Запах может быть при наличии сульфатредуцирующих процессов (ПДК до 2 баллов [17]).

Для удаления из воды взвешенных веществ и патогенных микроорганизмов рекомендуется использовать следующие процессы: механическое разделение в гравитационном поле или под действием центробежных сил, фильтрование через пористые загрузки и мелкие сетки, адгезия на высокодисперсных и зернистых материалах, а также гидроксидах алюминия или железа и глинистых минералах, агрегация флокулянтами, флотация примесей, а также бактерицидное и вирулицидное воздействие [22].

3) *Коллоидно-растворённые вещества* размером от 1 до 100 мкм представляют собой частицы, состоящие из сотен и тысяч молекул, при этом они обладают большой удельной поверхностью, которая способна адсорбировать на себе растворённые вещества. Коллоиды не оседают в течение длительного времени, что, в свою очередь, определяет характер очистки. В природных водах в коллоидно-растворённом состоянии находятся соединения кремния, алюминия, железа, органические вещества [6]. Их можно удалять из воды различными методами и технологическими приёмами – например, обработкой воды коагулянтами, известью, агрегацией флокулянтами катионного типа, а также окислением хлором, озоном и др., адгезией и адсорбцией примесей на гидроксидах алюминия и железа [22].

4) *Истинно-растворённые вещества* распределены в воде в виде отдельных молекул или ионов и представлены газами (кислород, азот, углекислота и пр.), минеральными солями (наиболее распространены Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , NH_4^+ , Fe^{2+} , Al^{3+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-) и некоторыми органическими соединениями. Их распространение в различных типах подземных водах представлено в таблице 1. Наиболее эффективные процессы, обеспечивающие очистку подземной воды от данных компонентов – аэрирование, окисление, адсорбция, а также связывание реагентами ионов, подлежащих устранению, в малорастворимые и малодиссоциированные (путём нейтрализации, комплексообразования) соединения [22].



Таблица 1. Распространение естественных загрязнителей в различных типах подземных вод (по данным [12])

Индекс	Тип	Естественные загрязнения
I	В речных долинах (в прибрежной зоне)	Fe, Mn, H ₂ S, микроорганизмы органические вещества и тяжёлые металлы
II	В артезианских бассейнах	Sr, F, Fe, Mn, Se, H ₂ S, жёсткость Металлогенические провинции – Fe, Mn, As, Mo, Pb, Se, Hg, Cr, Be, Cd, Nb и пр.
III	В конусах выноса	Se, Sr, нитраты, нитриты, аммоний и пестициды
IV	В ограниченных по площади структурах	Fe, Mn, F, Nb (ниобий), Ti (титан), Sr, Zn, Cu, Pb, As, Hg, Mo, W, Cd, Mi, Co, Se, Be
V	В бассейнах и потоках подземных вод	Сульфаты, хлориды
VI	В бассейнах субнапорных вод межморенных отложений	Нитраты, Fe, Mn
VII	В потоках трещинно-жильных вод	Sr
VIII	В периферийных частях лавовых потоков	Тяжёлые металлы
IX	В таликовых зонах области многолетнемёрзлых пород	Жёсткость, F, Fe, Mn

Как видно из таблицы 1, наиболее распространёнными естественными загрязнителями подземных вод являются F, Fe, Be, Sr, Mn, жёсткость, H₂S. ПДК ряда из этих компонентов близки к фоновым концентрациям в маломинерализованных подземных водах и являются соизмеримыми с ними (Таблица 2). Концентрации многих из данных элементов в подземных водах образуются в ходе естественных процессов формирования их химического состава и поэтому их наличие затрудняет решение проблем хозяйственно-питьевого водоснабжения.



Таблица 2. Концентрация некоторых компонентов в пресных подземных водах при pH от 6,5 до 8,5 и Eh от +500 до -300 мВ (по данным [12, 16, 22])

Наименование	Концентрация в подземных водах, мг/л	Основные формы нахождения в околонеитральных подземных водах	ПДК, мг/л по [17]
Стронций (Sr)	от <1 до 30	Sr ²⁺ , SrSO ₄ ⁰ , SrCO ₃ ⁰	7,0
Бериллий (Be)	0,000n – 0,00n	Be ²⁺ , Be(OH) _n ²⁻ⁿ , BeF _n ²⁻ⁿ , Be(F, OH) _n ²⁻ⁿ	0,0002
Фтор (F)	0,0n – 10n	F ⁻	1,2–1,5
H ₂ S		H ₂ S, HS ⁻ , S ²⁻	0,03
Железо (Fe)	0,0n – 10n	Fe ²⁺ , Fe(OH) ⁺ , FeHCO ₃ ⁺ , FeCO ₃ , FeSO ₄ , Fe(ФК) _n ³⁻ , Fe(HS) _n ²⁻ⁿ	0,3
Мышьяк (As)	0,00n – 0,0n	H ₂ AsO ₄ ⁻ , HAsO ₄ ²⁻ , H ₃ AsO ₄ ⁰ , H ₃ AsO ₃ ⁰ , H ₂ AsO ₃ , H ₃ AsS ₃ ⁰ , H ₂ AsS ₃ ⁻ , HAsS ₃ ²⁻ , AsS ₃ ³⁻ , HAsS ₂ ⁰ , AsS ₂ ⁻ , органические комплексы As	0,05
Марганец (Mn)	0,0n – n	Mn(HCO ₃) ₂ , органические комплексы Mn	0,1

n = 0...10

Рассмотрим подробнее свойства некоторых из этих компонентов и способы их очистки из подземных вод.

Дегазация воды

Удаление из воды растворённых в ней или образующихся в процессе её обработки газов называется дегазацией. Часто из подземных вод приходится удалять углекислоту, сероводород, кислород и метан. Следует отметить что CO_2 , H_2S и O_2 являются коррозионно-активными газами, которые приводят или катализируют процессы коррозии металла; более того, CO_2 может приводить к коррозии бетона. Сероводород придаёт воде неприятный запах. Учитывая это, при подготовке хозяйственно-питьевой воды для подачи потребителю необходимо полностью удалять из неё растворённые газы.

Методы дегазации воды подразделяются на физические и химические [22].

Сущность физических методов дегазации заключается в следующем:

- аэрирование – вода, содержащая удаляемый газ, приводится в соприкосновение с воздухом, где парциальное давление этого газа близко к нулю (так, в основном, удаляют CO_2 и H_2S),
- создаются условия, при которых растворимость газа в воде становится ничтожно малой (обескислороживание воды) – нагревают воду или доводят до кипения, либо понижают давление до величины, при котором вода кипит без дополнительного подогрева в вакуумных дегазаторах.

Удаление из воды растворённых газов происходит в дегазаторе, выделяют несколько их типов: плёночные с различного рода насадками, барботажные, пенные, вакуумно-эжекционные, вакуумные.

В основе химических методов удаления из воды растворённых газов лежит их химическое связывание, достигаемое введением реагентов или фильтрованием через специальные загрузки.

Углекислота (CO_2)

Свободная углекислота придаёт воде привкус. При кислой реакции ($\text{pH} < 7$) корродирует металлы, препятствует выпадению карбоната кальция, образующего защитные плёнки на металлических трубах [21].

Избыточное содержание углекислоты удаляется из подземных вод преимущественно физическими методами дегазации. Для глубокого удаления углекислоты (до 3-5 мг/л) используют плёночный дегазатор, загруженный кольцами Ришага. В поддон дегазатора вентилятором подаётся воздух, а вода поступает в верхнюю



часть дегазатора и равномерно распределяется по сечению плиты, имеющей патрубки для слива воды в насадку и патрубки с колпаками для выхода воздуха. Вода из поддонного пространства отводится через гидравлический затвор (Рис. 1). Кольцо Ришага представляет собой полый керамический цилиндр с равными высотой и наружным диаметром [22]. Использование плёночного дегазатора с кольцами Ришага также уместно при удалении CO_2 , образующегося в ходе деманганизации и

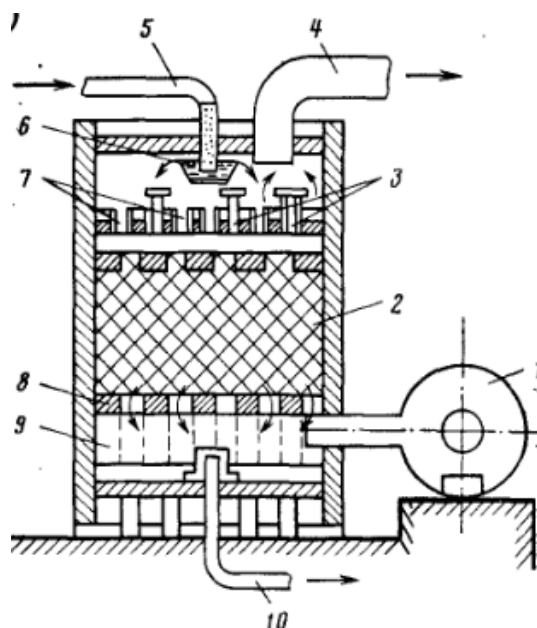


Рис. 1. Устройство пленочного дегазатора [22]

1 – вентилятор; 2 – насадка из керамических колец Ришага; 3 – газоотводный патрубок; 4 – удаление воздуха; 5, 10 – ввод исходной и отвод дегазированной воды; 6 – водораспределительная воронка; 7 – оросительные патрубки; 8 – дырчатое днище; 9 – поддон

обезжелезивания воды.

При водород-натрий-катионитовом умягчении или анионитовом обессоливании подземных вод для удаления свободной CO_2 следует применять вакуумные дегазаторы во избежание насыщения их кислородом. Вода внутри дегазатора распыляется и равномерно распределяется по поверхности решётки, на которую опираются кольца Ришага. Парогазовая смесь отводится из дегазатора вакуумным устройством, в качестве которого используют вакуум-насосы, паро- и водоструйные эжекторы. Следует отметить, что наиболее полная дегазация достигается разбрызгиванием в вакууме с одновременным подогревом воды [22]. На Рис. 2 представлены схемы установок для дегазации в вакууме с подогревом и без подогрева воды.

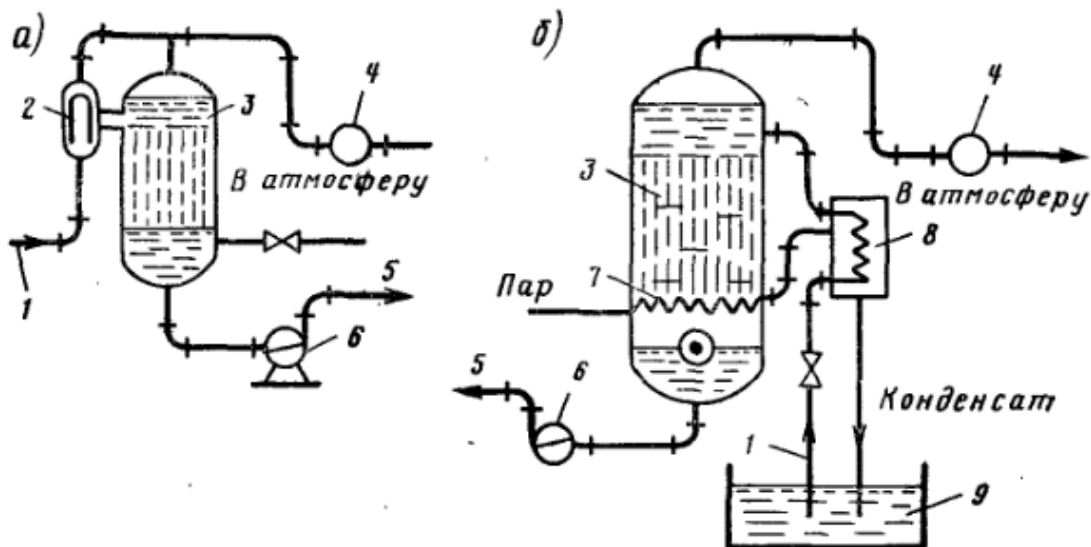


Рис. 2. Установка дегазации воды под вакуумом без подогрева (а) и с подогревом (б) [22]
1,5 – подача исходной и отвод дегазированной воды; 2 – воздухоотводитель; 3 – котёл; 4 – вакуум-насос; 6 – насос; 7 – подача пара; 8 – теплообменник; 9 – сборный бак.

Сероводород (H_2S)

Наличие сероводорода в подземных водах препятствует её использованию для хозяйственно-питьевых нужд и придаёт воде запах тухлых яиц. Подземные воды с содержанием сероводорода встречаются в Московской и Псковской областях, Краснодарском крае, Средней Азии, Поволжье, Приазовье и других районах бывшего СССР. Допустимое содержание сероводорода в питьевой воде должно быть не более 2 баллов [17], а в соответствии с требованиями европейского стандарта показателей качества воды – не более 0,05 мг/л.

В природной воде сернистые соединения находятся в виде молекулярно растворённого в воде сероводорода H_2S , гидросульфид-иона HS^- и сульфид-иона S^{2-} , а в случае присутствия в воде ионов железа образуется чёрная тонкодисперсная взвесь сульфида железа [7].

Вдыхание сероводорода, выделившегося из воды в воздух, может привести к ухудшению памяти, катару верхних дыхательных путей, бронхиту, фурункулёзу и конъюнктивиту [7]. Содержание в воздухе 0,8 мг/л сероводорода может стать причиной отравления со смертельным исходом. Вследствие образования гальванических пар сульфида железа подземных вод с железом, из которого изготовлены трубопроводы, происходит их интенсивная коррозия [7].



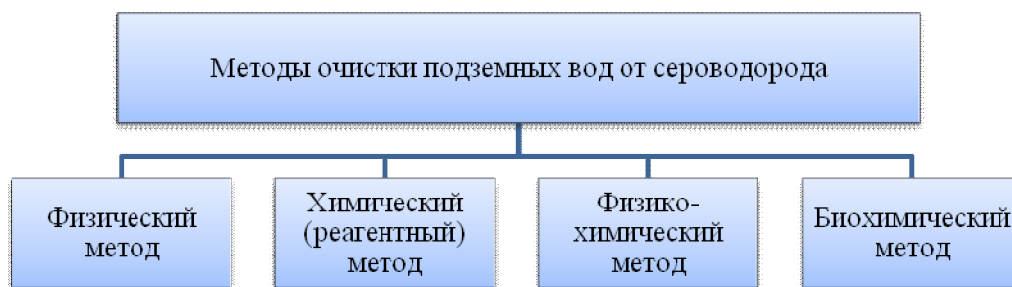
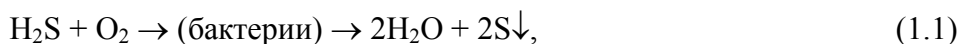


Рис. 3. Методы очистки подземных вод от сероводорода (по данным [22])

Снижение концентрации сероводорода до нормативных значений в подземных водах хозяйственно-питьевого назначения достигается с помощью физических методов очистки (аэрирование), химических – реагентных (окисление кислородом, хлором, использование гидрата окиси железа), физико-химических и биохимических методов (Рис. 3).

Сущность *биохимического метода* очистки подземных вод от сероводорода заключается в его окислении серобактериями (*Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus thioararus*, *Thiobacillus denitrificans* и др.) [2]. Для массового развития серобактерий необходимы определённые физико-химические условия (присутствие в воде некоторых микроэлементов – азота, фосфора, калия, железа, магния, цинка и др., определённые температура, pH и Eh и др.), что накладывает существенное ограничение на использование данного метода. Серобактерии окисляют H_2S до серы, которая в свою очередь окисляется до серной кислоты:



Для интенсивной деятельности серобактерий необходимо обеспечить нейтрализацию образующейся серной кислоты, что возможно в том случае, если в воде содержится достаточное количество карбонатов [22].

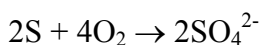
Низкие концентрации сероводорода в подземных водах с $pH < 9$ удаляют преимущественно *физическим аэрированием*. Для снижения высоких концентраций H_2S используют *физико-химический метод*, в котором подкислением воды до $pH < 5$ переводят все сернистые соединения в молекулярно-растворённую форму, а затем удаляют аэрацией [7].



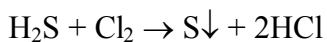
Часто метод физического аэрирования комбинируют с биохимическим окислением. После такой комбинированной очистки содержание сероводорода с 40-42 мг/л снижается до 0,3-0,4 мг/л [22].

В ходе *химической очистки* подземной воды от сероводорода его окисляют кислородом воздуха O_2 , хлором Cl_2 (при небольшом содержании H_2S), двуокисью хлора ClO_2 или озоном O_3 , а также используют взаимодействие сероводорода с гидроксидом железа(III) с последующей регенерацией образующегося сульфида железа(II). При этом химические реакции выглядят следующим образом:

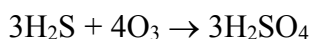
Окисление кислородом воздуха



Окисление свободным хлором



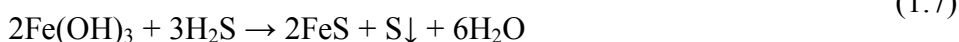
Окисление озоном



Окисление гидроксидом железа(III) в щелочной среде



Окисление гидроксидом железа(III) в нейтральной среде



Очистка подземной воды от H_2S с помощью гидроксида железа(III) очень эффективна при высоких содержаниях сероводорода (более 200 мг/л), при этом свободный сероводород удаляется довольно полно, вода теряет его запах и коррозионные свойства.

В последнее время широко используется метод удаления сероводорода из подземных вод путём фильтрования через модифицированную загрузку [22]. Сущность метода заключается в адсорбции ионов сероводородных соединений на зёрнах фильтрующей песчаной загрузки, покрытых плёнками гидроксида железа и диоксида марганца. При этом гидроксид железа и диоксид марганца вступают во взаимодействие с сероводородом и гидросульфидом, переводя их в сульфид железа и серу. В ходе очистки



содержание сероводорода в воде снижается до менее 0,05 мг/л, что удовлетворяет требованиям [17].

Жёсткость

Жёсткость обуславливается содержанием в подземной воде ионов кальция, магния, стронция, бария, железа, марганца. Но общее содержание в природных водах ионов кальция и магния несравнимо больше содержания всех других перечисленных ионов и даже их суммы, поэтому под жёсткостью понимают сумму количества ионов кальция и магния – общая жёсткость, складывающаяся из значений *временной*, устранимой кипячением карбонатной жёсткости (гидрокарбонаты кальция и магния), и *постоянной* некарбонатной жёсткости (сульфаты, хлориды, силикаты, нитраты и фосфаты кальция и магния).

В соответствии с [17] жёсткость воды не должна превышать 7 мг-экв/л. Основные неприятности от жёсткости – это накипеобразование, хотя присутствие в подземной воде солей магния в больших концентрациях влияют и на вкусовые качества воды [3].

Снижение показателя жёсткости воды достигается путём применения следующих методов [22]:

1. термических – основаны на нагревании воды, её дистилляции или вымораживании;
2. реагентных – находящиеся в воде ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} связывают различными реагентами (известью, содой, фосфатом) в практически нерастворимые соединения;
3. ионного обмена – фильтровании умягчаемой воды через специальные материалы, обменивающие входящие в их состав ионы Na^+ или H^+ на ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , содержащиеся в воде;
4. диализа;
5. комбинированных (различные сочетания перечисленных методов).

Выбор метода умягчения воды определяется её качеством, необходимой глубиной умягчения и технико-экономическими соображениями. В основном для умягчения подземных вод хозяйственно-питьевого назначения применяют ионнообменные методы, в ходе которого достигается глубокое умягчение воды – остаточная жёсткость 0,01-0,05 мг-экв/л [2]. Процесс очистки подземной воды на катионовых фильтрах выглядит следующим образом. Вначале происходит фильтрование подземной воды через слой катионита до момента достижения предельно допустимой жёсткости в фильтрате, затем производится взрыхление слоя катионита восходящим



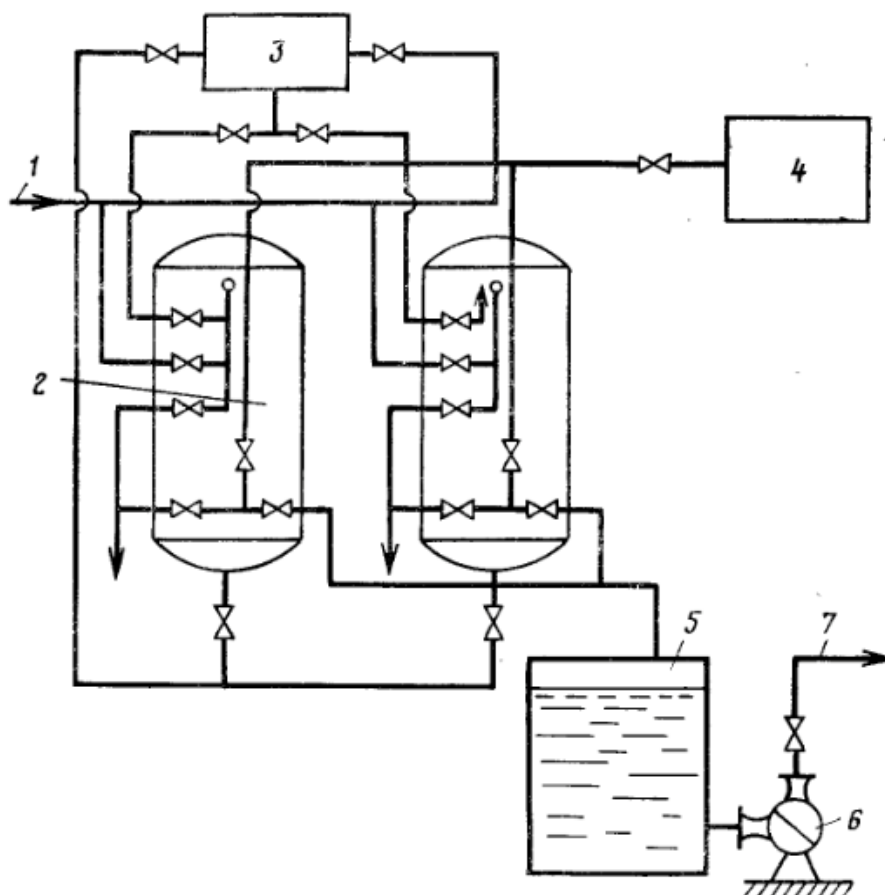
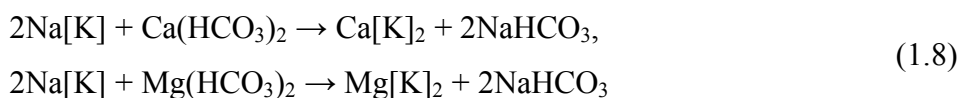


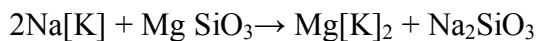
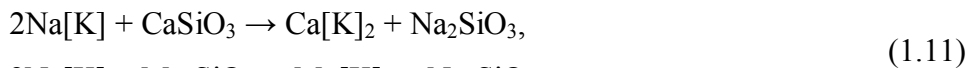
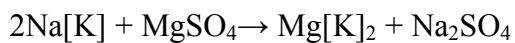
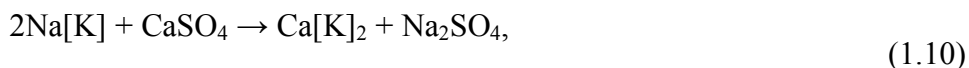
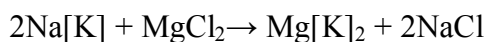
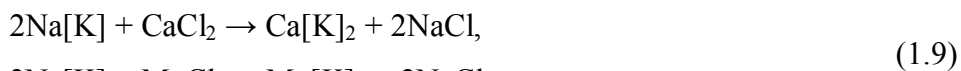
Рис. 4. Схема одноступенчатого Na-катионирования воды [22]

1, 7 – подача исходной и отвод умягченной воды, 2 – Na-катионный фильтр, 3 – бак с раствором поваренной соли, 4 – бак с частично умягченной водой для взрыхления катионита, 5 – резервуар умягченной воды, 6 – насос.

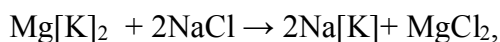
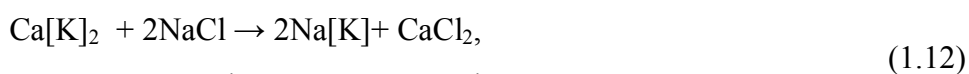
потоком умягченной воды, отработанного регенерата или отмывных вод. После этого водяная подушка спускается во избежание разбавления регенерирующего раствора. Затем катионит регенерируется посредством фильтрования соответствующего раствора и отмывается неумягченной водой.

Часто для умягчения воды с содержанием взвеси не более 8 мг/л и цветностью не более 30 градусов используют натрий-катионитовый метод [22]. Пример Na-катионитовой установки представлен на Рис. 4. Вода, пройдя Na-катионитовые фильтры, теряет ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} в ходе их обмена на ионы Na^+ . Процесс Na-катионирования описывается следующими общими реакциями, где [K] – нерастворимая матрица полимера катионита:





Далее умягчённая вода отводится в сборный бак, откуда насосом подаётся потребителю. Na-катионит регенерируется путём фильтрации через него хлористого натрия концентрацией 5-8%:



При работе по этой схеме отсутствуют вода и растворы с кислой реакцией, отпадает необходимость в применении кислотостойкой арматуры труб и защитных покрытий фильтров.

Фтор (F)

Концентрация фторид-ионов в природных водах Земли изменяется от 0,01 до 50-100 мг/л (Кения). Маломинерализованные и солоноватые (до 5 г/л) подземные воды верхних водоносных горизонтов с содержанием фтора более 1,5 мг/л широко распространены на территории РФ и бывшего СССР [12].



В земной коре имеется несколько типов подземных вод с высоким содержанием фтора, главными из которых на территории бывшего СССР являются [12]:

1. Пластовые воды структур, сложенные осадочными породами – содержание фтора может достигать 20 мг/л. Распространены во многих артезианских бассейнах Русской платформы (Московский, Прибалтийский, Днепровско-Донецкий и др.), в Якутском артезианском бассейне, в бассейнах восточной части Средней Азии. Основные формы нахождения F^- , NaF^0 , MgF^+ , CaF^+ , AlF_n^{3-n} , органические комплексы, например, $\text{F}^- - \text{Fu}$, $\text{Fu} - \text{Me}^{n+} - \text{F}^-$, где Fu – фульвокислота, Me^{n+} – металлы – такие как Al^{3+} , Fe^{3+} и т.д.
2. Трещинно-жильные воды массивов интрузивных, эффузивных и метаморфизованных пород. Распространены в Средней Азии, Забайкалье, Приморье, всей северо-восточной части бывшего СССР, Казахстане, на Кольском п-ове и пр.

Преобладающей формой является F^- (>90%), минимальную значимость имеют NaF^0 , а при высоких содержаниях кальция – и CaF^+ .

Фтор играет большую роль в жизни человека и животных. Если его концентрация в воде менее 0,5 мг/л, то развивается кариес зубов. Установлено, что данное заболевание характерно для районов с влажным климатом и сильновыщелоченными почвами, в которых распространены маломинерализованные подземные воды преимущественно HCO_3^- -Na состава, содержащие низкие концентрации Ca [12]. Содержание фтора в форме F^- более 1,5 мг/л вызывает флюороз как у людей, так и у домашних животных. Причём флюороз распространён в районах проявления вулканизма, а также на территориях, где имеются месторождения фосфоритов. Однако, в случае нахождения фтора в виде BF_4^- , он перестаёт быть токсичным для человека, так как данный комплекс устойчив в кислых средах. Аналогично снижает токсичность фтора образование комплексных соединений типа AlF_n^{3-n} , FeF_n^{3-n} [12].

Таким образом, оптимальная концентрация фтора в питьевой воде составляет 0,5 – 1,5 мг/л и достигается фторированием (введением в воду фторсодержащих реагентов) или наоборот, её обесфториванием (ионный обмен на селективных в отношении фтора анионитах или сорбция на свежесделанных осадках гидроокиси алюминия и магния и пр.) [2]. Следует отметить, что обесфторивание является более сложным и дорогостоящим процессом. Ещё одним способом снижения флюорозного действия фтора является метод добавления в воду комплексообразователей – например, алюминия [12].

Фторирование воды

Фторирование воды необходимо при содержании фтора менее 0,5 мг/л. Принцип фторирования питьевой воды (увеличение содержания фторидов до нормативных или заданных санитарным надзором) осуществляется путём добавления фторсодержащих реагентов (растворов и сухих порошков). При этом после обработки воды фактическая концентрация фтора в питьевой воде не должна отличаться от заданной концентрации более, чем на 0,1 мг/л [8]. В качестве реагентов могут быть использованы: кремнефтористый натрий Na_2SiF_6 , кремнефтористая кислота H_2SiF_6 , фтористый натрий NaF , кремнефтористый аммоний $(NH_4)_2SiF_6$, фтористый кальций CaF_2 , фтористоводородная кислота HF , кремнефтористый калий K_2SiF_6 , кремнефтористый алюминий $Al_2(SiF_6)_3$, фтористый алюминий AlF_3 и пр. Несмотря на то, в какой форме находится реагент – порошковой или раствор, все они подаются в воду в виде раствора. Место его введения выбирается в зависимости от способа очистки воды и технико-



экономических соображений, при этом должны быть соблюдены условия перемешивания реагента с питьевой водой и его минимальные потери.

На большинстве водоочистных комплексов фторирование является завершающей стадией очистки и предшествует хлорированию. Следует отметить, что хлорирование не удаляет фториды, однако содержание хлора и его производных обесцвечивают реагенты, добавляемые при определении фторидов, что может дать ошибку в определении концентрации фтора. На некоторых водоочистных комплексах хлор и фтор добавляют одновременно [22].

В случае, если подземная вода подаётся потребителю без очистки, то фтористые соединения поступают непосредственно в напорные водоводы. При небольшой нагрузке на фильтры фторсодержащие реагенты вводят перед фильтрами, при большой нагрузке – после фильтров, в трубопровод между фильтрами и резервуаром чистой воды или непосредственно в резервуар чистой воды. Иногда даже идут на потери концентрации фторидов, если это экономически выгодно. Например, при вводе реагента в неочищенную воду на фтораторной установке одного водоочистного комплекса в Вашингтоне потери фтор-иона составляют 0,1 мг/л [22].

Дефторирование воды

Обесфторивание воды необходимо при содержании фтора в подземной воде более 1,5 мг/л. В настоящее время используются две группы методов для снижения содержания фтора в воде [22]:

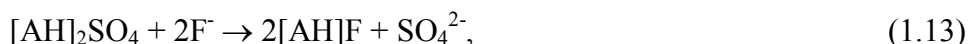
1. Метод сорбции фтора на фосфате калия или на свежевывавших осадках гидроксида алюминия или магния. Данный метод может найти применение для обработки подземных вод при необходимости их одновременного умягчения (реагентным методом) или осветления.
2. Метод фильтрования воды через фторселективные материалы (сильноосновные катиониты и аниониты, активированный оксид алюминия, магниезальные сорбенты, фосфат кальция, специально обработанные активированные угли, модифицированные загрузки, клиноптилолит) – при этом фтор удаляется в процессе пропуска обрабатываемой воды через сорбент в ходе ионного обмена.

Метод обесфторивания воды с использованием в качестве фторселективной загрузки сильноосновные катиониты и аниониты наиболее экономически эффективен при обесфторивании подземных вод одновременно с их опреснением.

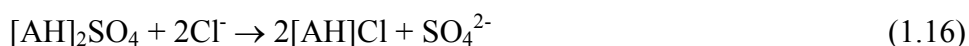
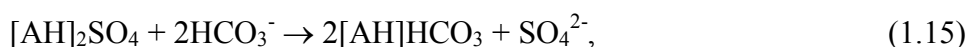


Пожалуй, наилучшие результаты по удалению фтора из питьевых подземных вод даёт метод дефторирования активированным оксидом алюминия, который является наиболее дешёвым сорбентом, простым в изготовлении и ёмким по поглощению фтора.

Принципиальная схема выглядит следующим образом [22]. Активированная окись алюминия действует как сорбент-анионит (АН), избирательно обменивающий ионы SO_4^{2-} или OH^- , которыми он заряжен в ходе регенерации, на ионы F^- в очищаемой воде при её фильтровании через данный анионит.



При этом в ионном обмене также участвуют ионы HCO_3^- и Cl^- :



С течением времени поглотительная способность сорбента уменьшается и при достижении 1,5 мг/л рабочий цикл обесфторивания воды прекращается и включается процесс регенерации. Регенерация сорбента производится пропуском через него раствора едкого натра или сульфата алюминия, в результате из него вытесняется поглощённый фтор. Затем сорбент промывается водой для удаления продуктов регенерации и непрореагировавшего реагента, после чего цикл очистки повторяется.

В ходе обесфторивания воды в результате ионного обмена происходит увеличение концентрации в фильтрате сульфатных ионов. Содержание сульфатов в питьевой воде не должно превышать 500 мг/л [17], поэтому увеличение концентрации сульфатов при обесфторивании воды необходимо учитывать при проектировании и расчёте комплексов по улучшению качества воды. Данный метод был опробован на водоочистой станции в Якутии [7].

Железо (Fe)

Подземные воды с повышенным относительно ПДК содержанием железа широко распространены в мире. Для территории РФ встречаемость подземных вод со сверхнормативным (более 0,3 мг/л [17]) содержанием железа варьирует в пределах от 15% (Удмуртия) до 88% (Тюменская область), составляя в целом по стране более 50%.

Повышенное содержание железа в воде придает ей буроватую окраску, неприятный металлический привкус, вызывает зарастание водопроводных сетей и водоразборной арматуры. Повышенное содержание железа в питьевой воде вредно для



здоровья человека. Длительное потребление большого количества железа на молекулярном уровне вызывает окисление двухвалентного железа до трёхвалентного, что приводит к возникновению тромбозов, увеличению свёртываемости крови, а также вызывает состояние, известное как гемохроматоз, когда в результате накопления железа развивается поражение тканей [15]. Опасность для здоровья человека, по данным S. K. Sharma [23], не возникает при потреблении в среднем $0,4 \div 1,0$ мг железа на килограмм массы тела в день.

В Российской Федерации ПДК железа в водах хозяйственно-питьевого назначения составляет 0,3 мг/л, но «по постановлению Главного государственного санитарного врача по соответствующей территории для конкретной системы водоснабжения на основании оценки санитарно-эпидемиологической обстановки в населённом пункте и применяемой технологии водоподготовки» допустимо использовать воду с концентрацией железа не более 1 мг/л [17].

Среди железосодержащих подземных вод зоны активного водообмена, используемых для питьевого водоснабжения, выделяют три основных геохимических типа: бескислородно-бессульфидные подземные воды, воды с высоким содержанием органических веществ, сульфидные железистые воды. В таблице 3 приведены основные формы железа в каждом из типов подземных вод и их распространение на территории бывшего СССР.

Таблица 3. Краткая характеристика железосодержащих типов подземных вод
(по данным [10, 12, 13, 14])

Геохимический тип подземных вод	Содержание железа, мг/л	Eh, mV	Основные формы железа	Распространение
Бескислородно-бессульфидные	до 100	50-250	Fe^{2+} , $Fe(OH)^+$, $FeHCO_3^+$, $FeCO_3$, $FeSO_4$	Московский, Средне-Амурский, Усть-Селенгинский, Западно-Сибирский и др. дальневосточные артезианские бассейны, Уральский и Донецкий массивы
С высоким содержанием органических веществ	$n \cdot 10$	100-400	$Fe(ФК)_n^{3-2n}$	Гумидная зона РФ, наиболее распространены в Мещере, Полесье, Карелии, Архангельской и др. областях севера европейской части РФ
Сульфидные железистые	2-3	<100	$Fe(HS)_n^{2-n}$	Отдельные горизонты Предуралья и Предкавказского артезианских бассейнов

Для очистки подземных вод от железа необходимо использовать метод адекватно формам, количеству железа и буферным свойствам исходной воды. Всё многообразие методов, применяемых в технологии обезжелезивания воды, можно свести к следующим



Рис. 5. Методы очистки подземных вод от железа (по данным [22])

типам (Рис. 5): внутрипластовое обезжелезивание подземных вод или очистка на наземных станциях обезжелезивания, которые, в свою очередь, делятся на реагентные и безреагентные.

Очистка на наземных станциях обезжелезивания

Безреагентные методы обезжелезивания могут быть применены преимущественно для бескислородно-бессульфидных подземных вод, при этом исходная вода должна характеризоваться: рН – не менее 6,7, щёлочностью – не менее 1 мг-экв/л,

перманганатной окисляемостью – не более 7 мг О₂/л, содержание Fe³⁺ не более 10% от общего [16, 22]. При концентрации Fe²⁺ в бикарбонатной или карбонатной форме:

- до 3 мг/л – рекомендуется метод фильтрования на каркасных фильтрах без вспомогательных фильтрующих средств;
- до 5 мг/л – метод «сухой фильтрации»;
- от 5 до 10 мг/л – метод упрощённой аэрации с одноступенным фильтрованием;
- от 10 до 20 мг/л – аэрация и двухступенчатое фильтрование;
- от 10 до 30 мг/л – вакуумно-эжекционная аэрация с фильтрованием через загрузку большой грязеёмкости.

Для сульфидных железистых подземных вод при содержании сероводорода 1-5 мг/л, рН 6,4 и при концентрации углекислого или карбонатного Fe²⁺ более 20 мг/л рекомендуется метод вакуумно-эжекционной аэрации с последующим отстаиванием в тонком слое воды или обработкой в слое взвешенного осадка и фильтрованием [22].

Реагентные методы обезжелезивания подземной воды (предварительная обработка воды реагентами, например, такими как хлор, озон, известь и др.) следует применять при низких значениях рН, высокой окисляемости, нестабильности воды. При этом при содержании сернокислого или карбонатного железа, либо комплексных железоорганических соединений [2, 22]:

- до 10 мг/л и перманганатной окисляемости до 15 мг О₂/л рекомендуется применять фильтрование через модифицированную загрузку;
- до 15 мг/л и перманганатной окисляемости до 15 мг О₂/л – метод упрощённой аэрации, обработку сильным окислителем и фильтрование через зернистую загрузку большой грязеёмкости;
- более 15 мг/л и перманганатной окисляемости более 15 мг О₂/л – напорная флотация с предварительным известкованием и последующим фильтрованием или метод, предусматривающий аэрацию, известкование, отстаивание в тонком слое и фильтрование.

Обезжелезивание воды катионированием целесообразно лишь в случае, когда одновременно с обезжелезиванием требуется умягчение воды.

Внутрипластовое обезжелезивание подземных вод

Альтернативой для наземной очистки подземных вод от железа может служить технология подземной очистки, основанная на процессах, имеющих место в природе, когда окисление и осаждение содержащегося в подземной воде железа происходит



непосредственно в водоносном пласте, а водовмещающие породы служат в качестве естественного фильтра. Это достигается созданием вокруг водозаборных скважин искусственных геохимических барьеров с окислительной обстановкой путем закачки в пласт аэрированной воды. Насыщение закачиваемой воды кислородом происходит при помощи компрессоров или эжекторов. Подобранный регламент работы установки обеспечивает создание достаточно больших зон окисления в пласте, чтобы процессы осадконакопления не смогли повлиять на производительность водозаборных скважин в течение всего срока их эксплуатации [1].

Для каждой скважины циклы закачки аэрированной воды и откачки подземной воды чередуются, при этом объем откачиваемой воды лимитируется допустимым содержанием железа. От цикла к циклу объем очищенной воды увеличивается, стабилизируясь, по данным работы [19], в зависимости от гидрогеологических и гидрохимических условий на 3-30-м циклах.

Согласно реакции



метод обезжелезивания подземных вод в пласте является выгодным с позиций потребления O_2 : на окисление 4 молей Fe^{2+} необходим всего 1 моль O_2 (на 1 мг Fe^{2+} требуется 0,143 мг O_2). Следовательно, закачав небольшое количество аэрированной воды в пласт, можно затем откачивать большее количество подземной воды, «свободной» от железа.

Эффективность технологии внутрипластового обезжелезивания определяет соотношение объёмов очищенной и закачанной воды. Следует отметить, что количество откачанной воды с допустимым минимальным содержанием железа может в 2-20 раз превышать количество закачанной воды [1].

Различают две технологические схемы внутрипластовой очистки подземных вод от железа; их различие заключается в способе подачи питательной (аэрированной) воды в пласт.

В способе, получившем название «Виредокс», для подачи воды в пласт используются специальные вспомогательные скважины, расположенные вокруг эксплуатационной (Рис. 6). В зависимости от гидрогеологических и гидрохимических условий сооружается от 5 до 14 поглощающих скважин в радиусе 5-10 м. Система рассчитана на периодическую работу установки с чередованием циклов закачки аэрированной воды в пласт через поглощающие скважины и последующего отбора



очищенной воды из центральной водозаборной скважины. Для обеспечения непрерывной подачи воды потребителю несколько установок «Виредокс» объединяются в единую систему с общим узлом подготовки аэрированной воды [9].

Даже на небольших водозаборах, работающих по принципу «Виредокс», необходима по крайней мере одна дополнительная установка или резервуар для хранения воды на закачку; это приводит к удорожанию системы водоснабжения. В связи с этим фирмой «Вирметодор» (Швеция) была предложена установка «Виредокс-2». Принципиальное её отличие состоит в следующем. Во всех поглощающих скважинах установлены погружные насосы, включающиеся периодически, причём независимо от работы насоса в центральной скважине (Рис. 6). Способ «Виредокс» запатентован и используется в ряде стран – США, Японии, Франции, Германии и России [1].

Второй способ предусматривает подачу воды в пласт и отбор обезжелезенной воды из пласта непосредственно через эксплуатационную водозаборную скважину. Он реализуется на установках фирмы «Субтерра» и ВНИИ ВОДГЕО (рис. 7) [18]. Способ «Субтерра» широко применяется на территории России и ближайшего зарубежья.

Несомненными преимуществами установок внутрипластовой очистки воды по сравнению с традиционными наземными станциями является:

- Отсутствие громоздких сооружений обработки воды, оборота промывных вод и утилизации осадка, что позволяет экономить значительные средства и земельные участки. Установлено [18], что капитальные и эксплуатационные затраты на очистку воды с помощью подземной технологии оказываются в 2-5 раз ниже, чем на наземных сооружениях.
- Подземная технология обеспечивает одноступенную безреагентную очистку подземных вод с содержанием железа до 35 мг/л, что принципиально невозможно на наземных сооружениях; производительность и эффективность значительно больше для подземной очистки, чем для поверхностных очистных сооружений.
- Наряду с удалением железа и марганца, в подземном пласте также происходит снижение концентраций сероводорода, аммонийного азота, фосфатов, силикатов и тяжёлых металлов (мышьяка и пр.).
- Подземная технология является безотходной и экологически чистой, поскольку все продукты реакций остаются под землёй.



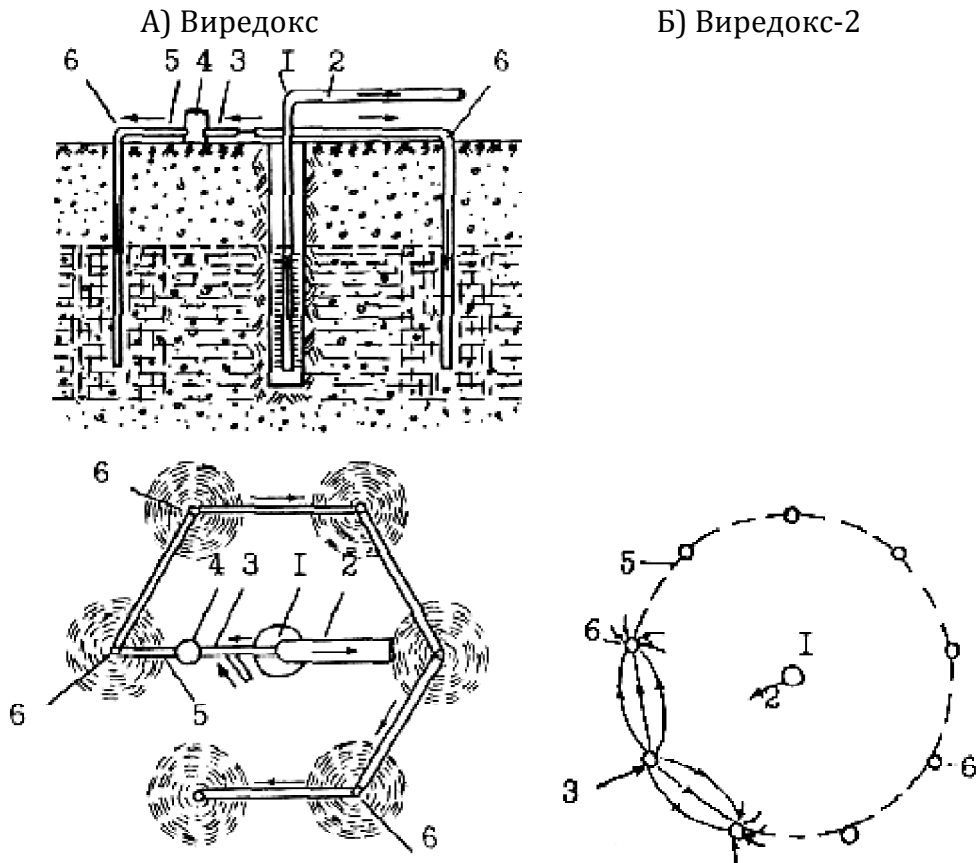


Рис. 6. Схемы установок обезжелезивания в пласте типа «Виредокс» [9]

1 – водозаборные скважины, 2 – трубопровод подачи воды потребителю, 3 – трубопроводы подачи воды в пласт, 4 – устройство для ввода реагентов или аэрации воды, 5 – трубопроводы подачи воды в пласт, 6 – поглощающие скважины.

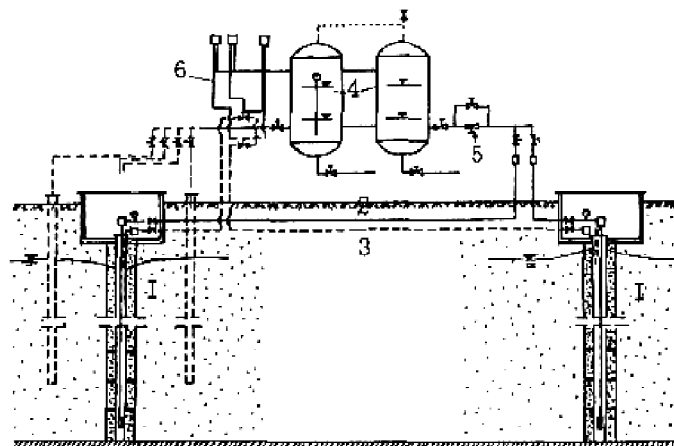


Рис. 7. Схема установок обезжелезивания в пласте фирмы «Субтерра» [18]

1 – водозаборные скважины, 2 – напорные трубопроводы, 3 – трубопроводы подачи аэрированной воды в пласт, 4 – напорные пневматические ёмкости, 5 – воздушный эжектор, 6 – блок управления.

Среди основных недостатков и сложностей в применении метода внутрипластового обезжелезивания подземных вод можно отметить:

- Кольматаж прифилтровых зон скважин гидроокислами железа, что, в свою очередь, снижает фильтрационные свойства водовмещающих пород. Таким образом, для поддержания стабильной работы систем внутрипластовой очистки воды должны быть предусмотрены периодические процедуры по реагентным регенерациям скважин, например, с использованием соляной кислоты с концентрацией, достаточной для растворения свежесажённых рыхлых осадков (часто используется концентрация 100 г/л), и объёмом, равном объёму зоны кольматажа. Технология реагентной регенерации скважин включает в себя закачку раствора соляной кислоты в зону фильтра, непосредственную обработку прифилтровой зоны и отдавливание отработанного раствора в пласт для нейтрализации раствора путём разбавления. При нейтрализации происходит переотложение растворённых осадков, но на расстоянии от скважины [18].
- При смене циклов закачки и откачки на фильтр водозаборной скважины оказывается значительная нагрузка, необходимо предусмотреть рентабельную нагрузку в соотношении расходов закачки и откачки. Так, например, большие входные скорости в циклах закачки и откачки могут спровоцировать суффозионные явления, если работы производятся в песчаных водоносных горизонтах.
- Определённое влияние на эффективность внутрипластовой очистки оказывает содержание кислорода в закачиваемой воде. Несмотря на то, что для окисления 1 мг Fe^{2+} требуется только 0,143 мг O_2 , на практике расходуется значительно больше кислорода за счёт параллельно протекающих реакций окисления. Иногда вследствие очень большого потребления кислорода процесс обезжелезивания в пласте может быть существенно затруднён.
- Высокие концентрации железа более 35 мг/л, высокая цветность воды, обусловленной присутствием гуминовых комплексов, низкие значения pH и температуры подземных вод, а также наличие ионов аммония, которые могут составлять конкуренцию с железом и марганцем при окислении за кислород, кремния и других могут осложнить или сделать нерентабельной внутрипластовую очистку.

Для регионов с высоким содержанием железа в подземной воде (более 35 мг/л) может рассматриваться альтернативный вариант двухступенчатой очистки, при которой происходит снижение концентраций железа и марганца в пласте до значений,



являющихся входными для наземных станций очистки, которые, в свою очередь, снижают уже эти концентрации до значений ПДК. Примером использования данной технологии является реконструированный в 2001 г. водозабор в п. Берёзово (ХМАО) производительностью 250-300 м³/сутки [18]. Источником водоснабжения посёлка являются подземные воды четвертичного водоносного комплекса, представленного тонкозернистыми песками, характеризующиеся низкими значениями рН 6,4-6,5, содержанием железа более 35 мг/л, марганца - 3,5 мг/л, а также наличием значительных концентраций кремния, фосфатов и аммония. В настоящее время на водозаборе работает двухступенчатая схема водоподготовки. На первой ступени в результате внутрипластового обезжелезивания концентрация железа и марганца снижается до 3,0 и 1 мг/л, а уже на второй ступени на наземных очистных сооружениях происходит доочистка и деманганация до значений ПДК.

Следует отметить, что работоспособность и производительность всей системы в целом зависит, конечно, от качества и надёжности скважин, используемых в установках подземной очистки. Так, бурение скважин, которые будут работать как водозаборные и как нагнетательные, необходимо осуществлять без применения глинистых буровых растворов. Кроме того, скважины должны быть оборудованы гравийным фильтром, каркас которого должен быть выполнен из антикоррозионных составов. Также при строительстве водозаборов, предусматривающих внутрипластовую очистку подземных вод, принципиальным является выполнение всех трубопроводов системы (сборных трубопроводов воды от скважин, трубопроводов, предназначенных для закачки воды в пласт и других) из антикоррозионных материалов, либо из пластика во избежание их коррозии и повторного насыщения очищенной воды железом.

Марганец (Mn)

В подземной воде, подаваемой хозяйственно-питьевыми централизованными водопроводами, содержание марганца не должно превышать 0,1 мг/л [17].

В подземных водах марганец находится преимущественно в форме бикарбоната марганца $Mn(HCO_3)_2$, хорошо растворимого в воде. При этом его концентрация колеблется от 0,5 до 2-3 мг/л [7]. Следует отметить, что Mn^{2+} чрезвычайно медленно окисляется до четырёхвалентного растворённым в воде кислородом и сильно зависит от рН. Так при рН < 8 окисление Mn^{2+} практически не происходит, а при рН > 9,5 можно отметить довольно быстрое окисление до Mn^{3+} и Mn^{4+} растворённым в воде кислородом.



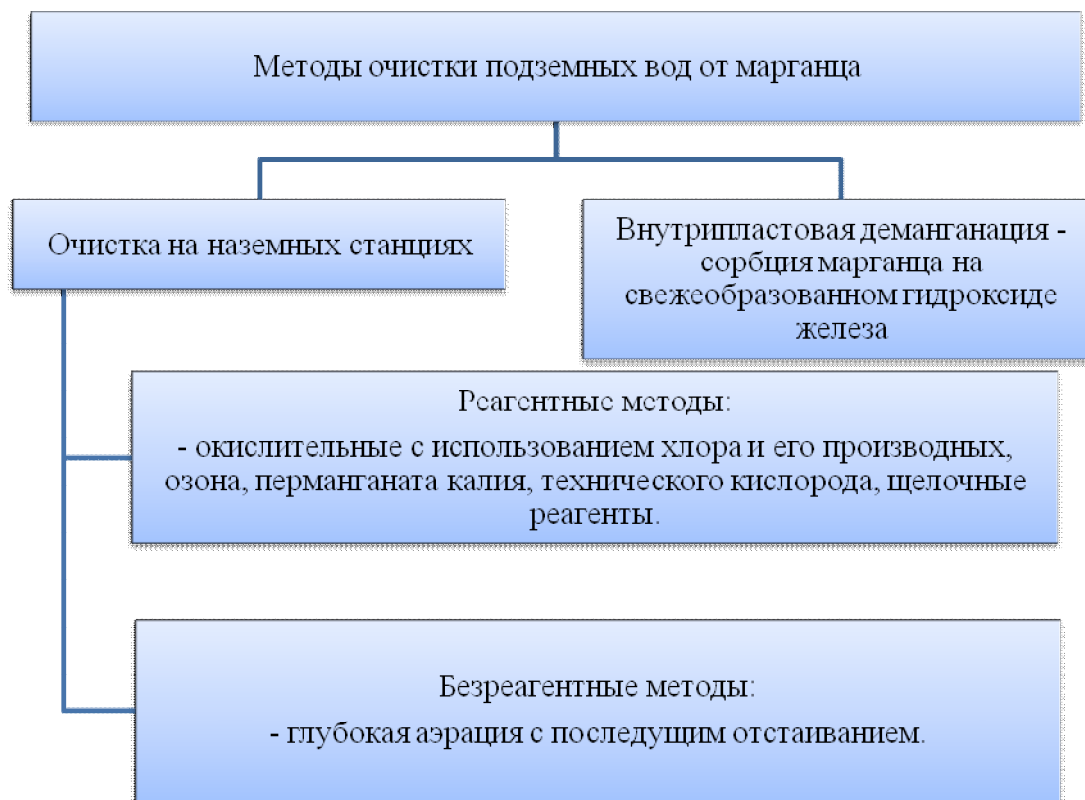


Рис. 8. Методы очистки подземных вод от марганца (по данным [22])



Методы деманганации подземной воды можно классифицировать на наземные (безреагентные и реагентные) и подземные (Рис. 8); а также на окислительные, сорбционные, ионообменные и биохимические. Следует отметить, что для деманганации подземных вод наибольший интерес представляют: метод сорбции на гидроксиде железа(III), фильтрование через модифицированную загрузку и биохимический метод [22].

Внутрипластовая деманганация подземных вод

Удаление марганца из подземных вод в пласте может быть достигнуто при условии достаточно высокого значения рН. При закачке в скважину воды, содержащей растворённый кислород, достигается окисление Fe^{2+} и Mn^{2+} , их соосаждение и задержание в порах водовмещающих пород. Считается, что на процесс деманганации в этом случае существенное влияние оказывают железо- и марганец-бактерии. Метод экономичный, относительно простой, однако, не всегда обеспечивающий надлежащую

глубину деманганизации воды. Считается целесообразным его использование при содержании марганца в подземной воде до 0,5 мг/л и высоком рН [22].

Очистка на наземных станциях деманганизации

Безреагентный метод глубокой аэрации (окисление кислородом воздуха) с последующим фильтрованием применяется при исходной окисляемости подземной воды до 9,5 мг O_2 /л; необходимым условием также является присутствие в подземной воде Fe^{2+} (возможно добавление железного купороса), которое при окислении кислородом образует гидроксид железа, адсорбирующий Mn^{2+} и каталитически влияющий на его окисление [22].

Реагентные методы основаны на окислении Mn^{2+} перманганатом калия, хлором, озоном или двуокисью хлора, с последующим отстаиванием выпавших в осадок гидратов окиси марганца и фильтрованием воды [2]. Наиболее эффективным и технологически простым методом является удаление Mn^{2+} из подземных вод путём обработки их перманганатом калия ($KMnO_4$) [22]. При этом наряду с марганцем удаляется и железо вне зависимости от форм их содержания в подземной воде, особенно это актуально при содержании органических комплексов Fe и Mn.

Деманганизация воды фильтрованием через модифицированную загрузку, представляющую собой песок, обработанный оксидами марганца или железным купоросом и перманганатом калия. В результате данной обработки на кварцевых зёрнах образуется плёнка из гидроксидов железа и оксидов марганца. В процессе фильтрации обрабатываемой воды (скорость фильтрации 8-10 м/ч) происходит сорбция Mn^{2+} на образованной плёнке и его концентрация в воде снижается [22].

Удаление Mn^{2+} из подземных вод *методом ионного обмена* (натрий-, водород-катионирование) целесообразно при одновременном глубоком умягчении воды и удалении из неё Fe^{2+} .

Биохимический метод удаления марганца заключается в высевании на зёрна загрузки фильтра марганецпотребляющих бактерий типа *Bacteria manganicus*, *Metallogenium personatum*, *Caulococcus manganifer* и последующем фильтровании обрабатываемой подземной воды. Данные бактерии поглощают марганец в процессе жизнедеятельности, а отмирая, образуют на зёрнах пористую массу, содержащую большое количество оксида марганца, служащего катализатором окисления Mn^{2+} . При скорости фильтрации до 22 м/ч фильтры полностью удаляют из воды марганец [22].



Мышьяк (As)

В околонеитральных подземных водах мышьяк образует следующие неорганические формы [11]:

- кислородсодержащие воды с $Eh > 300$ мВ – $H_2AsO_4^- > HAsO_4^{2-} > H_3AsO_4^0$;
- бескислородные и бессульфидные воды с $Eh < 150$ мВ – $H_3AsO_3^0 > H_2AsO_3^-$;
- сульфидные воды $H_3AsS_3^0$, $H_2AsS_3^-$, $HAsS_3^{2-}$, AsS_3^{3-} или $HAsS_2^0$, AsS_2^- .

Однако, следует отметить, что в подземных водах гумидной зоны основной формой мышьяка являются его органические комплексы, например, степень закомплексованности мышьяка с фульвокислотами может достигать 80% [11].

Содержание мышьяка в малокальциевых околонеитральных маломинерализованных водах может достигать $n \cdot 10$ мкг/л [11]. Предельно допустимая концентрация мышьяка в подземных водах хозяйственно-питьевого назначения составляет 0,05 мг/л [17] (Таблица 2).

Мышьяк удаляют из подземных вод соосаждением с гидроксидом железа(III) в ходе подземного обезжелезивания или на наземных станциях при обработке воды хлоридом или сульфатом железа(III) с подщелачиванием и продувкой воздухом. Органические соединения мышьяка таким образом удаляются труднее, поэтому их предварительно рекомендуется окислять хлором. Также мышьяк можно удалить при фильтровании подземной воды через ионитовые фильтры или активный уголь [22].

Стронций (Sr)

В маломинерализованных подземных водах достаточно часто содержание Sr выше ПДК (Таблица 2), причём его концентрация увеличивается с ростом минерализации. В общем концентрация Sr в подземных водах хозяйственно-питьевого назначения изменяется от < 1 мг/л в грунтовых водах наиболее увлажнённых районов гумидной зоны до 30 мг/л в грунтовых и напорных пластовых и трещинно-жильных водах повышенной минерализации. По данным термодинамического моделирования основным состоянием стронция в маломинерализованных подземных водах хозяйственно-питьевого назначения является Sr^{2+} , кроме того, могут также присутствовать $SrSO_4^0$, $SrCO_3^0$ [11].

Извлекать из подземных вод стронций рекомендуется путём его сорбции на свежееобразованном гидроксиде железа(III), который для небольших производительностей можно получать в электролизерах с железными анодами [22].



Список использованных источников

1. *Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Астрова Н.В.* Проблемы регулирования качества подземных вод. М.: ВИНТИ, 1984. 87 с.
2. *Арцев А.И., Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е., Хохлатов Э.М.* Проектирование водозаборов подземных вод. М.: Стройиздат, 1976. 292 с.
3. *Беликов С. Е.* Водоподготовка: Справочник. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования». – 15.06.2003.
5. ГОСТ 2761-84 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора». – 01.01.1989.
6. *Гуревич С.М.* Водоподготовка. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. 240 с.
7. *Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю.* Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. М.: Стройиздат, 1975. 176 с.
8. *Клячко В.А., Апельцин И.Э.* Очистка природных вод. М.: Издательство литературы по строительству, 1971. 579с.
9. *Коммунар Г.М.* Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения. Автореферат дисс. докт. техн. наук. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1987. 25 с.
10. *Крайнов С.Р., Соломин Г.А.* и др. Геохимические типы железосодержащих подземных вод с околонеutralной реакцией. Геохимия, 1982, № 3. С. 400-420.
11. *Крайнов С.Р., Швец В.М.* Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра, 1987. 237 с.
12. *Крайнов С.Р., Швец В.М.* Гидрохимия. Учебник для вузов. М.: Недра, 1992. 463 с.
13. *Крайнов С.Р., Соболев В.И., Соломин Г.А.* Железосодержащие подземные воды России, геохимические проблемы их обезжелезивания. Разведка и охрана недр, 2001, № 5. С. 14–20.
14. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
15. *Моденова О. А.* Гигиеническое обоснование безопасных уровней Mn и Fe при совместном присутствии в питьевой воде. Автореферат дисс. канд. мед. наук. М., 1991. 22 с.



16. *Плотников Н.А., Алексеев В.С.* Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
17. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.4.1074-01. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества». – 2001.
18. *Середкина Е.В.* Влияние гидрогеохимических факторов на процесс внутрипластовой очистки подземных вод от железа. Автореферат дисс. канд. техн. наук. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1992. 23 с.
19. *Середкина Е.В., Тесля В.Г.* Внутрипластовая очистка подземных вод с высоким содержанием железа. Гидротехника и инженерная гидрогеоэкология. М., ДАР/ВОДГЕО, 2004. Вып. 6. С. 115–119.
20. Санитарные нормы и правила. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – 1984.
21. *Суреньяц С.Я., Иванов А.П.* Эксплуатация водозаборов подземных вод (б-ка работника жил.-коммун. хоз-ва). М.: Стройиздат, 1989. 80 с.
22. *Фрог Б. Н., Левченко А.П.* Водоподготовка: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГУ, 1996. 680 с.
23. *Sharma, S. K.* Adsorptive iron removal from groundwater. Doctor thesis / Academic Board of Wageningen University and the Academic Board of the International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, Netherlands, 2001. 202 p.

