

УДК 628.161.2:546.72:628.112

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-78-84

МЕХАНИЗМ ОСАЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В ПРОЦЕССЕ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ДЛЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

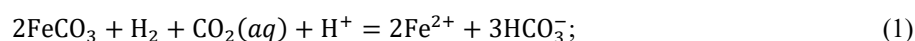
Е.И. РАШКЕВИЧ¹⁾, канд. техн. наук В.Д. ЮЩЕНКО²⁾
(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»)
¹⁾ *selenaruko@gmail.com, ²⁾ yuvd46@mail.ru*

В статье описывается механизм осаждения железа при проведении начальных и последующих циклов внутрипластовой обработки подземной воды на разнозернистых песках для систем водоснабжения малых населенных пунктов.

Ключевые слова: *метод внутрипластовой обработки подземной воды Subterra, качество воды, технология и особенности начальных и последующих циклов «закачки-откачки» воды, механизм осаждения железа.*

Введение. В Республике Беларусь для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения повсеместно используются артезианские подземные воды, которые имеют более высокую защиту от внешних воздействий и качество их состава по сравнению с поверхностными источниками.

Проводимый ежегодный анализ химического состава подземных вод на территории Республики Беларусь [1; 2], полученных из скважин глубиной 30–350 м четвертичных водоносных горизонтов, показал, что они могут характеризоваться как пресные гидрокарбонатные, кальциево-магниевые и кальциево-натриевые с общей минерализацией 0,2–0,4, и до 0,6 г/дм³, могут включать комплекс неорганических и органических веществ, газов, микрофлоры (железо, марганец, соли аммония и другие загрязнители), но пригодны, после соответствующей очистки, для использования в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов на всей территории республики. При этом немалая часть (более 50%) эксплуатируемых скважин, особенно в бескислородно-бессульфидных подземных водах, в составе основных загрязнений подземных вод имеют только повышенные концентрации железа и марганца, а остальные показатели соответствуют нормативным значениям. Распределение этих микроэлементов в воде будет контролироваться растворимостью их карбонатов, например, FeCO₃ (PP_{FeCO₃}=2,9·10⁻¹¹). В нейтральных и слабощелочных реальных гидрогеохимических условиях, когда концентрация карбонатных ионов (HCO₃⁻+CO₃²⁻) значительно превышает концентрацию OH⁻, именно это соединение регламентирует распределение Fe²⁺, а не его закисные формы FeO и Fe(OH)₂, степень насыщения которых ниже по отношению к соединению FeCO₃. Тогда гидролиз соединения FeCO₃ в подземных водах происходит в соответствии со следующей реакцией:



$$[\text{Fe}^{2+}]^2 = 10^{-9,8} \frac{[\text{CO}_2(aq)][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]^3}. \quad (2)$$

Из указанных реакций следует, что условием, благоприятным для увеличения концентрации Fe²⁺, является рост концентрации CO₂ в водной системе и уменьшение величины pH. С ростом pH происходит обратная реакция, подземные воды приближаются к насыщению по FeCO₃ и дальнейшее накопление Fe²⁺ в этих водах замедляется. В таком случае присутствия простых миграционных форм железа подземные воды быстро очищаются при аэрировании.

В России и странах Западной Европы довольно широко применяется для удаления железа из подземных вод метод внутрипластовой обработки *Subterra*^{1,2} [3; 4]. Сущность метода заключается в ведении процесса обезжелезивания непосредственно в водоносном горизонте (слое) путем циклической «закачки-откачки» воды в одной и той же скважине. При закачке воды, предварительно обогащенной кислородом, например, воздуха, в скважину, вокруг нее происходит образование специальной зоны для окисления и осаждения железа в поровом пространстве водоносной породы. В дальнейшем из скважины производится откачка воды в систему водоснабжения населенного пункта так, чтобы у потребителей концентрация железа не превышала нормируемой величины. Затем цикл «закачки-откачки» подземной воды из скважины повторяется.

Технологическая и экономическая эффективность данного метода оценивается исходя из минералогического состава водоносных слоев и химического состава подземных вод, но, как правило, выше, чем в сооружениях наземного типа. Следует отметить, что при этом обычно соблюдается сравнительно равномерная подача воды в системы водоснабжения с расходом свыше 1000 м³/сут, когда применяются скважины с числом более двух, что упрощает проведение циклов «закачки-откачки».

¹ Болдырев К.А. Гидрохимическое моделирование процессов внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Болдырев Кирилл Александрович. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 2011. – 190 л.

² Государственный водный кадастр Республики Беларусь: ежегодные отчеты «Водные ресурсы, их использование и качество вод» за 2016–2024 гг. URL: <https://cricuwr.by/publications/archive-cadastral-information> (дата обращения 12.02.2026).

Системы водоснабжения малых населенных пунктов отличаются значительными изменениями режима водопотребления по расходам воды в отдельные часы и простоям в ночное время. Это приводит к тому, что применяемые для водообработки аэрационные сооружения наземного типа (ex-situ) часто приходится рассчитывать и эксплуатировать с учетом подачи воды в максимальные часы водопотребления, т.е. увеличиваются капитальные и эксплуатационные затраты. Также в отсутствие централизованной системы водоотведения возникают проблемы с отводом промывных и загрязненных вод, образующихся в процессе водоподготовки.

В связи с этим было решено выполнить исследования по возможному применению метода *Subterra* (in-situ) для удаления железа до нормируемых значений и снабжения водой именно таких малых населенных пунктов.

Экспериментальная часть. В качестве объекта исследования был принят малый населенный пункт Докшицкого района Витебской области Республики Беларусь, в котором система водоснабжения имеет две скважины, которые можно использовать попеременно как поглощающую, так и эксплуатационную. Основными водоносными слоями скважин являются песчаные породы.

До начала эксперимента в скважине № 1 качество исходной воды по основным показателям составило: концентрация общего железа Fe^0 – 2,67 (двухвалентное железо Fe^{2+} – 2,20 или 82,4% от общего), марганца – 0,36 мг/дм³. Величины pH и Eh в исходной воде были равны 7,7 и 54 мВ.

Соответственно в исходной воде скважины № 2, концентрация общего железа составила 3,08 (двухвалентное железо – 2,51 или 81,5%), марганца – 0,38 мг/дм³, а величины pH и Eh – 7,6 и 65 мВ. Низкие значения величины Eh свидетельствуют о присутствии в подземной воде этих микроэлементов преимущественно в двухвалентной форме.

Для оценки работы скважины на водопроводную сеть при проведении первого цикла «закачки-откачки» воды методом *Subterra* контрольной точкой была принята концентрация общего железа не более 0,3 мг/дм³. В процессе проведения этого эксперимента установлено следующее [5]:

- наблюдался несистемный разброс концентрации железа в откачиваемой воде (0,15–0,9), хотя в среднем эта величина не превышала 0,3 мг/дм³;
- коэффициент полезного использования метода, представляющий отношение объемов откаченной из скважины воды к закаченной (м³) $K = W_{om} / W_z$, составил 9,3. Это уже принципиально, что внутрипластовая обработка может быть применена при удалении железа из подземных вод для малых населенных пунктов;
- было отмечено улучшение органолептических показателей (≤ 2 баллов), при этом не происходило изменение концентрации аммонийных соединений – 0,2–0,3 мг/дм³, окисляемости – 1,8 мгО₂/дм³ и ухудшения параметров бактериального анализа;
- концентрация растворенного кислорода в начальный период откачки воды была равна 1,8–2,0, а к концу первого цикла снижалась до 0,5–0,8 мгО₂/дм³;
- величина pH в процессе закачки воды в скважину и дальнейшей ее прокачки практически не изменялась и составляла 7,6–7,7;
- установление величины Eh более 130–150 мВ в откачиваемой воде свидетельствует об удовлетворительном окислении двухвалентного железа и его задержании в подземном пласте.

Несистемный разброс в ходе эксперимента концентрации железа в откачиваемой воде указывает на то, что окислительная зона вокруг скважины еще окончательно не была сформирована.

По концентрациям общего и двухвалентного железа их соотношение получилось следующим:

- при $Fe^0 \geq 2,5$ соотношение $Fe^0 = 1,22Fe^{2+}$ или $Fe^{2+} = 0,82Fe^0$;
- при $Fe^0 = 0,1–0,7$ соотношение $Fe^0 = 12,5Fe^{2+}$ или $Fe^{2+} = 0,08Fe^0$;
- при $Fe^0 \leq 0,1$ соотношение $Fe^0 = 16,7Fe^{2+}$ или $Fe^{2+} = 0,06Fe^0$.

В дальнейшем были проведены семь последовательных циклов «закачки-откачки» воды рассматриваемых скважин [6], которые показали, что окислительная зона с получением устойчивых значений концентрации железа 0,05–0,20 мг/дм³ в откачиваемой воде установилась после 5-го цикла, с коэффициентом полезности равным 12,4.

Таким образом, можно считать, что данная технология in situ позволяет обеспечить более эффективную очистку подземных вод при их обезжелезивании до нормативных значений для малых объемов водопотребления по сравнению с традиционными поверхностными напорными установками и является экономически предпочтительнее. При этом для образования устойчивой окислительной зоны вокруг скважин требуется выполнить определенное число первичных циклов. Некоторые исследователи считают³, что в условиях равномерной подачи воды из скважин достаточно 2–3 цикла. Очевидно, для условий резкого изменения режима водопотребления этого недостаточно.

Механизм осаждения железа в процессе внутрипластовой обработки воды. Многие авторы [6–9] отмечают, что геохимия и механизм внутрипластовой обработки воды представляют собой сложные процессы, зависящие от типа водоносной породы, гидродинамики подземного потока, ее качества и многих других факторов.

Рассмотрим механизм осаждения железа в процессе внутрипластовой обработки воды для малых населенных пунктов при первичных и последующих циклах работы скважин.

³ См. сноску 2.

В данном случае материалом водоносных слоев рассматриваемых скважин являются кварцево-полевошпатовые пески, с комбинацией мелкого и среднезернистого состава и содержанием 60% кварца SiO_2 , 18–20% $\text{Fe}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_3$, остальное – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ и KAlSi_3O_8 .

Тогда можно предположить, что в первичных циклах, кроме прямого окисления железа в подземном водоносном пласте, одновременно идут процессы хемосорбции кислорода в зерна полевошпатовых песков и ионный обмен ионов натрия на железо.

Прямое окисление железа происходит преимущественно за счет простого смешения объемов закаченной в пласт кислородсодержащей воды с подземной вокруг скважины на расстоянии x в результате их гидродинамической дисперсности, которая представляет собой рассеивание границы раздела между ними на внутриводном и молекулярном диффузионном уровне с созданием потока мигранта (кислорода) от начальной его концентрации C_0 до практически нулевого значения. Для песчаных водоносных пород, как одномерный случай, плотность диффузионного потока и его изменение описывается I-м законом Фика:

$$v_d = -D_M \cdot \text{grad}C = -D\partial C/\partial x; \quad (3)$$

$$D_M = \chi n_0 D_M^0, \quad (4)$$

где v_d – плотность диффузионного потока через единичную площадь в единицу времени, $\text{г}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$;

C – концентрация мигранта (кислорода), $\text{мг}/\text{дм}^3$ ($\text{г}/\text{м}^3$);

D_M – коэффициент молекулярной диффузии, причем выбор единиц для измерения количества вещества определяется характером конкретной задачи (единицы массы, объема, моли и т.д.), например, $\text{см}^2/\text{с}$ ($\text{м}^2/\text{сут}$);

D_M^0 – коэффициент молекулярной диффузии в свободной среде, равный 10^{-4} , $\text{м}^2/\text{сут}$;

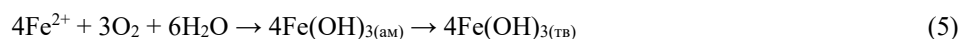
χ – параметр извилистости путей фильтрации в пористой среде, равный для несцементированных песков 0,5–0,7;

n_0 – пористость песка, принятая равной 0,32 (32%).

Согласно этому закону, величина диффузионного потока вещества через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффузии, прямо пропорциональна величине концентрации в данном сечении, площади этого сечения, времени и градиенту концентрации, направленному по нормали к изоконцентрационной поверхности. Диффузия всегда является неравномерным процессом, увеличивает энтропию системы и приближает ее к состоянию равновесия. Первый закон Фика позволяет понять физический смысл коэффициента диффузии D_M , который численно равен плотности потока диффузанта при градиенте концентрации равном единице. Поскольку этот поток вещества стремится выровнять перепад потенциала или концентрации, можно сказать, что коэффициент диффузии является мерой скорости, с которой система способна при заданных условиях выровнять разности концентраций и химических потенциалов. Вследствие этого в изолированной системе имеется тенденция к исчезновению концентрационных градиентов.

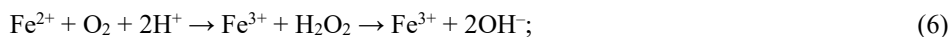
Приведенные выражения справедливы для изотермических процессов двух однотипных потоков с избытком одного и с одним смешиваемым газом или веществом, лучше при одинаковых коэффициентах диффузии, как в данном случае. Однако встречаются зоны, где коэффициент диффузии может быть значительно ниже, чем в самом водоносном слое, в котором зерна породы имеют форму вытянутых сфероидов и в свою очередь группируются в сферолиты, причем они в объеме имеют сферически симметричную форму, а около поверхностной непроницаемой области (глина – потолок водоносного слоя скважин) – вытянуты перпендикулярно поверхности, что и снижает коэффициент диффузии. Наличие таких зон усложняет решение поставленной задачи в аналитическом виде (если его вообще можно получить). Но для первоначальных выводов этим обстоятельством можно пренебречь, так как концентрационные деформации элементарного объема пренебрежимо малы по сравнению с самим объемом водоносного слоя.

В математической модели внутриводной обработки воды методом *Subterra* предполагается⁴ [5; 6], что при закачке обогащенной кислородом воды в песчаный водоносный слой происходит первичное медленное образование окислительной зоны, которое в итоге имеет вид цилиндра с высотой этого слоя и осью, совпадающей со скважиной. Радиус фронта поршневого вытеснения кислорода, равный расстоянию x , к моменту окончания закачки воды в скважину определен математическим расчетом для рассматриваемого нашего случая при закачке 300 м^3 в 3,6 м. Тогда плотность диффузионного потока через единичную площадь в единицу времени составит порядка $(-5 \cdot 10^{-5}) \text{ г}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$. Знак минус указывает на то, что перенос растворенного кислорода в нейтральной области величины рН происходит из области большей в область меньшей концентрации, а его величина косвенно свидетельствует о медленной скорости процесса окисления водных форм двухвалентного железа. Причем по агрегатному состоянию реагирующих веществ такие реакции являются гомогенными и протекают в одной системе, например, в виде водного раствора с образованием ОН-лиганд:



⁴ См. сноску 2.

Также, возможно, протекает химическая реакция, которая имеет перекисный ионо-радикальный характер (аналогично гипотезе В.И. Вернадского):



Определяющей является реакция (6), а скорость перекисной реакции можно определить по следующей формуле:

$$dC_{\text{Fe}^{2+}}/dt = -k_p \cdot C_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{Fe}^{3+}}, \quad (9)$$

где k_p – константа скорости реакции.

Все эти процессы приводят к выпадению осадка $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в межпоровом объеме породы, причем значительный разброс значений концентраций железа в первоначальных циклах обработки воды объясняет то, что пока еще не произошло образование оксигидроксидов железа и окисно-каталитического пленочного слоя вокруг зерен водоносной породы.

Если в материале водоносной породы наблюдается хотя бы незначительно рыхлая поверхность и будет содержание активных групп алюмосиликатов $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, как в нашем случае, то может наблюдаться не только адсорбция кислорода на поверхности зерен, но и его хемосорбция с образованием гидроксильных групп и последующим диффундированием их из зерен.

Хемосорбция кислорода на зернах водоносного слоя есть избирательный процесс сорбции, сопровождающийся химическими реакциями в поверхностном слое. В отличие от других видов сорбции, хемосорбция кислорода на твердом теле чаще всего необратима и мала по сравнению с физической сорбцией, а реакции в поверхностном слое зависят от химической природы поверхностей и протекают медленно. Причем электроны, необходимые для их проведения, как раз поставляются алюмосиликатной группой.

Основные аспекты хемосорбции кислорода в воде на данной водоносной породе состоят в следующем:

- механизм: кислород взаимодействует с активными центрами твердого тела, образуя прочные химические связи;
- сорбенты: металлы (Fe, Cu, Zn), углеродная фаза и материалы, содержащие алюмосиликатную группу;
- факторы: процесс усиливается при увеличении температуры, турбулизации воды или изменении pH среды.

Помимо хемосорбции кислорода на твердом теле в первичных циклах, имеет значение для всего ионного состава подземных вод способность микроэлементов и их соединений удерживать на своей поверхности значительное количество поглощенных ими ионов, хотя также идет и обратный процесс, который заключается в том, что некоторая их часть может при взаимодействии с водной макросистемой обмениваться на другие ионы. Тогда в результате различных сорбционных процессов в гидрогеохимических системах «порода-вода» поверхность твердых фаз породы будет заряжена катионами и анионами и может происходить взаимный обмен [6; 7] между ионами натрия, содержащегося в водном растворе и твердом теле полевошпатных песков, на ионы двухвалентного железа, причем способность данного элемента к ионному обмену основана прежде всего на его отрицательном заряде, который возникает вследствие замещения ионов высокой валентности Fe^{2+} низковалентными Na^+ . При этом система «твердая фаза-раствор» будет электронейтральной и обмен ионами идет в соответствии с их стехиометрическим соотношением.

Ионообменные явления осложняются наличием комплексообразователей, которые могут быть образованы при координировании одним атомом одного или более ионов, а также молекулами, состоящими из центральной частицы и координированных вокруг нее лигандов (аддендов) Это хотя и уменьшает концентрацию ионов Fe^{2+} , способных к обмену, но их общая величина не изменяется.

Например, система железа Fe^{2+} с оксалат-анионом $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ образует в конечном итоге комплекс $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$, который представляет собой двухзарядный анион, производный от щавелевой кислоты, часто выступающий в роли бидентатного лиганда. В результате способность железа не только к катионному обмену с ионами натрия, но и к сорбции на поверхности твердого тела уменьшается. Это связано еще с тем, что ионы натрия в небольшом количестве имеют необходимую степень свободы, а остальная часть входит в кристаллическую решетку зерен водоносной породы и их обмен затруднителен.

Аналогично происходит в результате растворения гидрата сульфата железа $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с образованием аквакомплекса $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O}_6)^{2+}]^{2+}$, который в свою очередь может быть исходной формой для образования других типов комплексов. Установлено, что гидроксо- и ацидокомплексы двухвалентного железа (сульфатные и хлоридные) обладают значительно большей реакционной способностью в реакциях с кислородом по сравнению с его аквакомплексами, но при этом они могут не полностью прекращать процессы гидролиза соединений железа, особенно формы Fe^{3+} . По сравнению с $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ аквакомплексы имеют слабую устойчивость.

Количество всех ионов, которые участвуют в этих процессах, обозначают емкостью ионного (катионного) обмена ЕКО, мг-экв/100 г. поглощающего комплекса. Повышенное значение ЕКО (до 30 мг-экв/100 г) может наблюдаться в первых циклах обработки подземных вод и будет способствовать эффективности удаления железа. В дальнейшем на втором этапе ионообменные процессы в системе «вода-порода» будут идти очень медленно (до 3 мг-экв/100 г) или вообще прекращаться [6; 7].

Для окисления и удаления железа при образовании устойчивой окислительной зоны авторами [8] предложен механизм, который связан с заданным количеством кислорода, поданным в подземный водоносный пласт, физической адсорбцией на материале водоносной породы и использованием его в качестве акцептора электронов e^- с последующим переходом двухвалентной формы Fe^{2+} в трехвалентную Fe^{3+} . Причем скорости гетерогенного окисления превышают скорости гомогенного. Такой подход был усовершенствован и более детально рассмотрен в работах⁵ [9; 10].

Основная роль принадлежит гетерогенному окислению железа адсорбированным кислородом на зернах породы водоносного слоя. Процесс адсорбции железа на поверхности его оксигидроксидов идет с образованием комплексов, которые приводят к изменению плотности оболочки зерен породы, в результате чего происходит быстрое окисление ионов Fe^{2+} кислородом. Также возможно, что при поглощении кислорода материалами пласта происходит, особенно в процессе закачки воды в скважину, его адсорбция и хемосорбция на материале водоносного горизонта, который в период откачки постепенно расходуется на окисление железа.

Реакции этого процесса протекают на границе раздела двух фаз «твердое тело-газ» в водной среде, особенно при ее более высоких щелочных условиях и величине Eh свыше 130–150 мВ. При этом вещество $Fe(OH)_3(вод.)$ переходит путем полимеризации в $Fe(OH)_3(ам.)$, образуя вокруг скважины сплошную реакционно-активную поверхность оксигидроксидов железа на зернах породы, состоящую из гетита $FeO(OH) \cdot nH_2O$, ферригидрита $5Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ и магнетита $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$, которые в итоге представляют окисно-каталитическую пленку.

Результаты проведенных экспериментов [2; 5] показали, что в процессе внутрислоевого удаления железа при равных объемах закачки наблюдается увеличение коэффициента полезности метода в последовательно проводимых циклах «откачки-закачки», что можно объяснить накоплением его оксигидроксидов в пространстве вокруг скважин, на поверхности которых и происходит основная часть окисления Fe^{2+} , причем выпадающие гидротригидратные формы Fe^{3+} образуют новые сорбционные центры гидроксильных групп OH^- (рисунок 1)⁶. Но в дальнейшем идет полное заполнение поверхности зерен породы оксигидроксидами, часть из них выпадает в осадок, новые порции заполняют их места, и тогда сорбционная способность пласта остается постоянной на одном уровне.

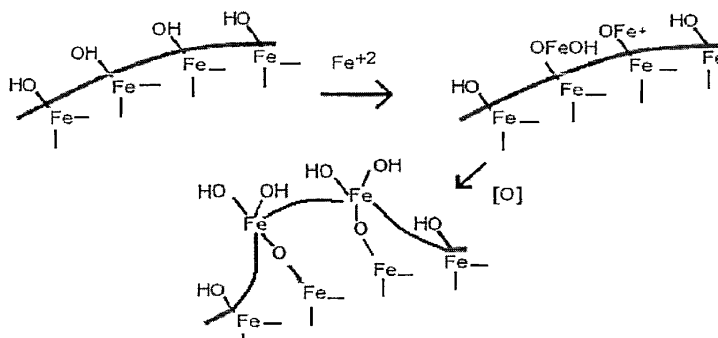


Рисунок 1. – Схема автокатализа в результате образования новых сорбционных участков в процессе выпадения оксигидроксидов железа. В результате выпадения новых порций железа увеличивается число сорбционных центров ($-OH$ -групп)

При обработке подземной воды для малых населенных пунктов в условиях большого количества последовательных циклов «закачка-откачка» в около скважинном пространстве может происходить образование железобактерий, которые синтезируют органические вещества из неорганических для своей жизнедеятельности, получают энергию для обмена веществ от окисления железа. Процессы бактериальной внутрислоевой обработки подземных вод повышают эффективность удаления железа и идут одновременно с химическим его окислением.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали принципиально возможное применение метода *Subterra* (in-situ) для удаления железа из подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов.

В первичных циклах «закачки-откачки» воды в скважине, кроме прямого окисления железа в подземном водоносном пласте, одновременно идут процессы хемосорбции кислорода на зерна полевкошпанных песков и ионный обмен ионов натрия на железо.

⁵ См. сноску 2.

⁶ См. сноску 2.

Прямое окисление железа происходит преимущественно за счет простого смешения объемов закаченной в пласт кислородсодержащей воды с подземной вокруг скважины, и для песчаных водоносных пород, как одномерный случай, плотность диффузионного потока и его изменение описывается I-м законом Фика. Причем по агрегатному состоянию реагирующих веществ такие реакции являются гомогенными и протекают в одной системе, например, в виде водного раствора с образованием ОН-лиганд.

Процесс хемосорбции кислорода на твердом теле идет с образованием гидроксильных групп и последующим диффундированием их из зерен песчаной породы. В данном случае это есть избирательный процесс сорбции, сопровождающийся медленно протекающими необратимыми химическими реакциями в поверхностном слое, и ее величина мала по сравнению с физической сорбцией.

Способность железа к ионному обмену основана прежде всего на его отрицательном заряде, который возникает вследствие замещения ионов высокой валентности Fe^{2+} низковалентными Na^+ . При этом система «твердая фаза-раствор» будет электронейтральной и обмен ионами идет в соответствии с их стехиометрическим соотношением. Ионообменные явления осложняются наличием комплексообразователей, которые хотя и уменьшают концентрацию ионов Fe^{2+} , способных к обмену, но их общая величина не изменяется.

По результатам пяти первичных откачек воды из скважин был установлен значительный разброс концентраций железа, что свидетельствует о постепенном процессе создания устойчивой окислительной зоны окисления железа.

Для окисления и удаления железа при образовании устойчивой окислительной зоны предложен механизм, который связан с физической адсорбцией кислорода на материале водоносной породы ведением гетерогенных окислительных процессов с образованием реакционно-активной поверхности оксигидроксидов удаляемого загрязнителя на зернах породы, состоящей из гетита $FeO(OH) \cdot nH_2O$, ферригидрита $5Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ и магнетита $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$, которые в конечном итоге представляют окисно-каталитическую пленку.

Итак, в результате окисления железа гетерогенным путем $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$ в нейтральных и слабощелочных бессульфидных водах идут реакции гидролиза с гидроксильными группами $Fe(OH)_n^{3-n}$ с переходом при $n=3$ в $Fe(OH)_3^0$, далее $FeO(OH) \cdot nH_2O$, $5Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ и $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$. То есть можно предположить, что окончательный механизм и порядок окисления железа происходит исключительно за счет реакций, протекающих на активизированной поверхности водовмещающих пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудельский А.В., Пашкевич В.И. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 261 с.
2. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Закачка воды в подземный водоносный пласт скважины из пылевидного и средне-мелкозернистого песка при малом водопотреблении // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 14(3). – С. 64–70. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70.
3. Середкина Е.В. Внутрипластовая очистка воды, итоги и перспективы // Водоснабжение и сантехника. – 2004. – № 2. – С. 34–38.
4. Rott U., Friedle M. 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland // Wasser, Abwasser. – 2000. – Bd. 141, № 13. – S. 53–62.
5. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Применение метода внутрипластовой обработки подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов // Сб. науч. ст. по итогам работы Междунар. науч. форума «Наука и инновации – современные концепции» / г. Москва (11 апреля 2024 г.). – Т. 2. – М: Инфинити, 2024. – С. 215–223.
6. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2012. – 672 с.
7. Henry M., Jolivet J.P., Livage J. Aqueous chemistry of metal cations: Hydrolysis, condensation and complexation // Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses. Structure and Bonding / R. Reisfeld (Eds.), C.K. Jørgensen (Eds.). – 1992. – Bd. 77. – S. 153–206.
8. Unterrirdische Enteisung und Entmanganung ein Statusbericht / P. Groth, F. Bühring, R. Dannöhl et al. // Das Gas- und Wasserfach. – 1988. – Bd. 129, № 5. – S. 321–339.
9. Коммунар Г.М., Янбулатова Ф.Х. Кинетические закономерности окислительно-восстановительных реакций на поверхности железа и марганца. Методы расчета процессов массопереноса в гидрогеологических исследованиях. – М., 1984. – 148 с.
10. Середкина Е.В., Круглик С.И., Тесля В.Г. Кондиционирование подземных вод на геохимических барьерах // Материалы XVII Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. – Красноярск, 2003. – 128 с.

REFERENCES

1. Seredkina, E.V. (2004). Vnutriplastovaya ochistka vody, itogi i perspektivy. *Vodosnabzhenie i santehnika*, 2, 34–38. (In Russ).
2. Rott, U. & Friedle, M. (2000). 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland. *Wasser, Abwasser*, 141(13), 53–62. (In German).
3. Kudel'skij A.V., Pashkevich V.I. (2024). *Regional'naja gidrogeologija i geohimija podzemnyh vod Belarusi*. Minsk: Belaruskaja navuka (In Russ).
4. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2022). Zakachka vody v podzemnyj vodonosnyj plast skvazhiny iz pylividnogo i srednemelkozernistogo peska pri malom vodopotreblenii [Water injection into the underground aquifer of the well from pulverized and medium-fine-grained sand at low water consumption]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(3), 64–70. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70. (In Russ., abstr. in Engl.).

5. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2024). Primenenie metoda vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod v sistemakh vodosnabzheniya mal'kikh naseleennykh punktov. *Sb. nauch. st. po itogam raboty Mezhdunar. nauch. foruma «Nauka i innovatsii – sovremennye kontseptsii»*, 2, 215–223. (In Russ).
6. Krajnov, S.R., Ryzhenko, B.N., & Shvec, V.M. (2012). *Geohimija podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i jekologicheskie aspekty*. Moscow: Nauka (In Russ).
7. Henry, M. & Jolivet, J.P. & Livage, J. (1992). Aqueous chemistry of metal cations: Hydrolysis, condensation and complexation. *Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses. Structure and Bonding*, 77, 153–206. (In German).
8. Groth, P., Bühring, F., Dannöhl, R., Liessfeld, R., Olthoff, R. & Rott, U. (1988). Unterrirdische Enteisenung und Entmanganung ein Statusbericht. *Das Gas- und Wasserfach*, 129(5), 321–339. (In German).
9. Kommunar, G.M., & Janbulatova, F.H. (1984). *Kineticheskie zakonomernosti okislitel'no-vosstanovitel'nykh reakcij na poverhnosti zheleza i marganca. Metody rascheta processov massoperenosa v gidrogeologicheskikh issledovanijah*. Moscow. (In Russ).
10. Seredkina, E.V., Kruglik, S.I., & Teslja, V.G. (2003). Kondicionirovanie podzemnykh vod na geohimicheskikh bar'erah. *Materialy XVII Vserossijskogo soveshhanija po podzemnym vodam Vostoka Rossii*, 128. (In Russ).

Поступила 20.03.2026

MECHANISM OF IRON DEPOSITION IN THE PROCESS OF INTRAPLASTIC WATER TREATMENT FOR SMALL SETTLEMENTS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

H. RASHKEVICH, V. YUSHCHENKO

(Vitebsk Regional Municipal Unitary Enterprise of water supply and sewage “Vitebskoblvodokanal”)

The article describes the mechanism of iron precipitation during initial and subsequent cycles of in-situ treatment of groundwater on fine-grained sands for small settlements' water supply systems.

Keywords: *Subterra's in-situ treatment method for underground water, water quality, technology and features of initial and subsequent water injection and extraction cycles, mechanism of iron deposition.*