

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ И УСЛОВИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

**Э.И. Михневич**, доктор технических наук, профессор

**Д.Э. Пропольский**, аспирант

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

### Аннотация

Даётся анализ основных методов удаления железа, отмечаются их преимущества и недостатки. Наиболее распространённым является метод очистки воды от железа путём её аэрации или введением окислительных агентов с последующим фильтрованием. Показана важная роль реагентов-коагулянтов в освобождении воды от взвеси и коллоидных веществ. Для глубокой очистки воды, используемой в пищевой и электронной промышленности, эффективно фильтрование через мембраны.

**Ключевые слова:** обезжелезивание воды, методы, технологии, реагенты, фильтрующие материалы

### Abstract

**E.I. Mikhnevich, D.E. Propolsky**  
**METHODS OF DEIRONING OF WATER,  
ANALYSIS AND CONDITION OF THEIR USE**

Analysis of main methods of water deironing is given, all advantages and disadvantages are described. The most effective method of cleaning is aeration or addition of oxidizing agents, followed by filtration. The important role of coagulant reagents in freeing water from suspended matter and colloidal substances is shown. It is effective to filter through membranes for deep cleaning of water used in the food and electronics industries.

**Keywords:** water deironing, methods, technologies, reagents, filtering materials

### Введение

В Беларуси проблема удаления железа из подземных и поверхностных вод является актуальной. Повышенное содержание железа наносит значительный вред здоровью человека. Избыток железа вызывает зарастание водопроводных сетей, водоразборной арматуры в системах водоснабжения.

Способ очищения от железных примесей зависит от формы содержащегося в воде железа [1, 2]. В поверхностных водах железо обычно встречается в виде органических и минеральных комплексных соединений, либо коллоидных или тонкодисперсных взвесей. В подземных водах железо преобладает в виде бикарбоната  $Fe(HCO_3)_2$ , но встречается также в виде сульфида  $FeS$ , карбоната  $FeCO_3$ , сульфата  $Fe_2(SO_4)_3$ , а также комплексных соединений с гуматами и фульвокислотами.

Технологии очистки природных вод от железа подразделяют на безреагентные, реагентные и комбинированные. Исходные концентрации железа лимитируются для различных технологий, при этом обеспечивается достижение необходимой степени очистки, соответствующей СанПиН 10-124 РБ 99 «Вода питьевая» [3].

Особую проблему при обезжелезивании воды на заторфованных территориях, особенно в Бело-

русском Полесье, создаёт наличие торфяников, при контакте с которыми подземные воды обогащаются гуминовыми соединениями. Это приводит к образованию в них форм железа в виде сложных железо-органических комплексов, удаление которых из воды невозможно традиционными безреагентными (аэрационными) методами [4].

Требуемый эффект обезжелезивания такой воды достигается применением реагентов, но при этом схема сооружений водоподготовки усложняется. Упрощение схемы и состава сооружений станции обезжелезивания достигается путём применения физических методов обработки воды перед её поступлением на фильтры, использованием специфических фильтрующих материалов, избирательно удаляющих органические соединения железа.

**Формы железа.** Железо в воде может встречаться в следующих видах:

- истинно растворённое ( $Fe^{2+}$ , вода прозрачная, бесцветная);
- нерастворённое ( $Fe^{3+}$ , вода прозрачная с коричневато-бурым осадком);
- коллоидное / тонкодисперсное (вода желтовато-коричневая, осадок не выпадает даже при длительном отстаивании);

- соли железа, гуминовых и фульвокислот (вода желтовато-коричневая);

- железобактерии (коричневая слизь на водопроводных трубах) [5].

В воде поверхностных источников железо находится обычно в виде гуминовокислого железа и тонкодисперсной взвеси гидроксида железа. При появлении в воде сероводорода  $H_2S$  образуется тонкодисперсная взвесь сульфида железа  $FeS$ .

Подземные источники воды характеризуются наличием растворенного бикарбоната двухвалентного железа  $Fe(HCO_3)_2$ , который весьма устойчив при отсутствии окислителей [6]. Эффективность обезжелезивания воды в основном зависит от реакции среды  $pH$  и окислительно-восстановительного потенциала.

При  $pH < 7,0$  процесс окисления  $Fe^{2+}$  в  $Fe^{3+}$  замедляется [7]. Следовательно, чем выше уровень  $pH$ , и чем ближе вода к пределу насыщения кислородом, тем быстрее протекает реакция окисления [8, 9].

**Основные методы удаления железа, их преимущества и недостатки.** Очистка воды от железа производится путем ее аэрации или введением окислительных агентов с последующим фильтрованием. В результате железо переходит в формы нерастворимого гидроксида этого металла, которые затем улавливаются фильтровально-сорбционной загрузкой.

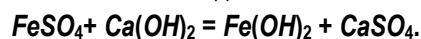
В качестве фильтровально-сорбционного материала можно использовать кварцевый песок, алюмосиликатные сорбенты, антрацит, сульфуголь, шунгит, керамзит, пиролюзит, а также фильтрующие материалы, обработанные катализатором, ускоряющим процесс окисления  $Fe^{2+}$  в  $Fe^{3+}$ . В последнее время вследствие высокой экономичности и эффективности большое распространение за рубежом получили наполнители с каталитическими свойствами. Среди известных зарубежных марок выделяют *Manganese Green Sand (MGS)*, *Birm*, *MTM* [6]. Также есть российские каталитические загрузки марок КДМ, МХС, КП-1 [10], успешно заменяющие зарубежные аналоги.

Использование фильтрующих материалов эффективно после периода вработки. В результате зерна загрузки покрываются адсорбционно-каталитической пленкой из соединений железа. Продолжительность вработки составляет от нескольких

часов до нескольких недель [7]. Ряд примесей, таких как сероводород, свободная углекислота, коллоидная кремниевая кислота, аммиак ухудшают каталитические свойства пленки.

Основными методами обезжелезивания воды являются упрощенная аэрация, метод «сухого» фильтрования, введение реагентов-коагулянтов, введение реагентов-окислителей, окисление на основе каталитической загрузки, подщелачивание воды путем добавления извести. Реже используют ионообменный метод, обезжелезивание в пласте (метод «Vyredox»), обезжелезивание с помощью мембранных методов.

**Упрощенная аэрация.** Данный метод является весьма экономичным и обладает большой производительностью. Среди недостатков метода можно выделить невозможность обезжелезивания аэрацией при содержании в воде сульфата железа  $FeSO_4$ . При гидролизе образуется кислота, понижающая  $pH$  воды до 6,8 и ниже, при этом процесс гидролиза почти прекращается. Для удаления из воды кислоты требуется ее известкование с осаждением гипса  $CaSO_4$ :



Если в исходной воде содержится более 40 мг/л свободной углекислоты и более 0,5 мг/л сероводорода, то воздух в трубопровод не вводят [11].

**Метод «сухого» фильтрования.** Сущность метода – фильтрация воздушно-водяной эмульсии через сухую зернистую фильтрующую загрузку нагнетанием большого количества воздуха с последующим его отводом.

В порах загрузки образуется турбулентный режим движения смеси, способствующий формированию адсорбционно-каталитической пленки на поверхности зерен.

Преимущество метода: низкий темп прироста потерь напора, высокая продолжительность фильтрационного цикла, возможность исключения второго подъема. Недостатки: сложность поддержания расчетного рабочего режима, сложность или отсутствие возможности регенерации загрузки [12].

**Введение реагентов-коагулянтов.** Освобождение воды от взвеси и коллоидных веществ достигается путем ввода реагентов-коагулянтов. Коагулянт образует в воде хлопья, которые адсорбируют на своей поверхности коллоиды и выделяются в виде осадка.

Среди коагулянтов чаще всего применяется сульфат алюминия (глинозем)  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ , также применяются сульфат железа (железный купорос)  $FeSO_4 \cdot 7 H_2O$ , хлорное железо  $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$  и полигидроксихлорид алюминия  $Al_2(OH)_5Cl$ .

#### Введение реагентов-окислителей

##### Окисление хлором и гипохлоритом натрия.

После обработки воды хлором содержание железа во всех случаях становится меньше 0,1 мг/л. Под действием хлора происходит разрушение гуматов и других органических соединений железа и переход их в форму неорганических солей  $Fe^{3+}$ .

Этот метод весьма распространен, но обладает рядом недостатков: хлор вызывает сложности при хранении больших объемов, придает неприятный вкус и запах воде, он высоко токсичен и несёт угрозу при аварийных ситуациях.

В последние годы используют обработку воды раствором гипохлорита натрия  $NaOCl$ . *Преимущества:* эффективность в течение длительного времени, низкая требуемая доза, сильное действие на органику и способность улучшать органолептические свойства воды.

**Обработка воды перманганатом калия ( $KMnO_4$ ).** Окисления  $Fe^{2+}$  осуществляется раствором перманганата калия  $KMnO_4$ . Он может также вводиться в сочетании с гипохлоритом натрия с целью обработки сложных вод и экономии до 80 % дорогостоящего перманганата калия. Введение этого реагента перед подачей в воду  $NaOCl$  разрушает органические вещества. Ввод реагентов в другой последовательности приводит к разрушению хлорпродукта.

**Озонирование** является перспективным методом окисления железа. Одновременно с обеззараживанием происходят процессы окисления  $Fe^{2+}$ , обесцвечивание воды, дезодорация и улучшение органолептических свойств воды.

Преимуществом озонирования является его быстрое и эффективное очищение всех видов микробов, быстрое превращение озона в кислород без образования побочных продуктов, изменения кислотности, вкуса и запаха.

Недостатки озонирования: озон причислен к особо опасным веществам, несущим угрозу при аварийных ситуациях; кроме того, медицинские исследования показали, что озонирование воды кроме больших клеток убивает и здоровые.

Как отмечается во французском справочнике Дегремон [8], озонирование применяют при высокой цветности, мутности, при высоком содержании железа, гуминовых кислот и комплексообразующих агентов, вызывающих значительное замедление скорости окисления и выпадения железа.

**Ионообменный метод.** Метод используется при необходимости одновременного умягчения воды. Недостатки: возможность извлечения только растворенного железа  $Fe^{2+}$ . Метод применим при концентрации 0,05–0,3 мг/л.

**Обезжелезивание с помощью мембранных методов.** Наиболее эффективными системами водочистки являются установки на основе мембранных методов. Однако при высокой концентрации железа происходит резкое снижение проницаемости мембраны. Таким образом применение ионообменного и мембранного методов целесообразно лишь при необходимости глубокого удаления железа для нужд медицины, пищевой, химической промышленности и в других обоснованных случаях.

**Обезжелезивание в пласте (метод «Vyredox»).** Реализация данного метода непосредственно в водоносном пласте зависит от ряда факторов и используется как временная мера. Недостаток метода: использование обезжелезивания в пласте может привести к экологической проблеме по причине загрязнения водоносного пласта [5, 15, 16].

**Окисление на основе каталитической загрузки.** Метод применим при концентрации железа до 10 мг/л и  $pH$  равном 6,2–8,5. Окисление железа происходит на поверхности специальной фильтрующей загрузки. В её основе – диоксид марганца. В присутствии оксида марганца железо легко окисляется и оседает. Среди плюсов окисления можно выделить относительную простоту, высокую производительность, эффективность, экономичность. Однако системы на основе каталитического окисления имеют ряд ограничений: каталитическое окисление неэффективно в отношении органического железа, которое образует на поверхности гранул органическую пленку, метод не эффективен при содержании железа в воде выше 10–15 мг/л, а наличие марганца в воде ухудшает эффективность обезжелезивания. Оптимальный эффективный размер частиц – 0,6–1 мм, а скорость фильтрации – 5–15 м/ч [9].

**Подщелачивание воды путём добавления извести.** Для подщелачивания среды в обрабатываемую воду добавляется известковое молоко как самый эффективный реагент. Для уменьшения расхода реагента данный метод применим вместе с аэрацией [17, 18, 19]. При выборе технологии деферризации учитывают положения действующих нормативных документов [20].

**Перспективные методы удаление железа.** Согласно [6], среди современных эффективных способов удаления органического железа выделяют сорбцию на слабоосновных анионитах-органоплотителях. Поэтому применение таких анионитов предпочтительно. Данная загрузка эффективна при концентрациях железа до 30 мг/л, удаление железа на этой загрузке не требует использования аэрационных устройств, окислителей и коагулянтов, она эффективно удаляет органическое и коллоидное железо, соли жесткости и ионы тяжелых металлов, не зависит от pH и не требует высоких скоростей при взрыхляющей промывке.

В 2009 году словацкие учёные нашли новый материал, используемый для деферризации воды – природный цеолит-клиноптилолит. В процессе эксперимента они сравнили материал с импортными загрузками *Birm* и *Greensand* (таблица 1) и установили, что цеолит-клиноптилолит подходит для удаления железа из воды и не уступает импортным аналогам [21]. На поверхности клиноптилолита зерна имеется пленка, состоящая из оксидов марганца ( $MnO_2$ ). Поэтому данный материал значительно эффективнее обычных зернистых загрузок.

Данный материал обладает достаточной механической прочностью, химической стойкостью и истираемостью, а использование цеолита позволяет увеличить скорость фильтрации в 4 раза.

Представляет интерес также установка из Великобритании «De-IRON», комбинирующая окисле-

ние кислородом воздуха, каталитическое и биологическое окисление [22]. В системе используется полистирольная фильтрующая загрузка (пластик). Преимущества установки заключаются в том, что она не требует применения химических реагентов.

**Биологический метод удаления железа.** В последние годы значительно вырос интерес исследователей к биологическому удалению железа как к природному методу, не производящему токсичных веществ или опасных микроорганизмов. [23]. Железобактерии биологически окисляют  $Fe^{2+}$  и фиксируют его на своих клеточных оболочках. Потому задержание железа на данных фильтрах лучше, чем на физико-химических установках.

Биологическая метод имеет ряд преимуществ: окисление и фильтрация данным методом протекают весьма быстро и не требуют использования реагентов. Окисленное железо задерживается в компактной форме, что даёт большую грязеемкость фильтра, а промывка не требует много воды [6].

Наиболее важными железобактериями являются *Gallionella ferruginea*, *Leptothrix*, *Sphaerotilus*. Рост бактерий оказывает глубокое каталитическое влияние на окисление железа, а стебли *G. ferruginea* дают им возможность колонизировать и выживать в среде с высоким содержанием железа. С момента открытия железобактерий перспективы их использования для удаления железа из подземной воды резко увеличились, но широкого распространения они не получили по причине недостаточной изученности процессов биологического окисления извлекаемых веществ [24].

**Исследования на станциях обезжелезивания в городе Минске.** В тех случаях, когда избыточное содержание железа наблюдается лишь на отдельных рассредоточенных водозаборах, более рациональным является использование компактных мобильных установок с напорными фильтрами.

Таблица 1. – Фильтрующие материалы и их параметры

МАТЕРИАЛ	КЛИНОПТИЛОЛИТ	BIRM	GREENSAND	ПЕСОК
Размер зёрен (мм)	0,3-2,5	0,48-2,0	0,25-0,8	0,7-2,0
Плотность частиц (кг/м <sup>3</sup> )	2390	2000	2400-2900	2660
Плотность материала (кг/м <sup>3</sup> )	840	700-800	1360	1550
Пористость (%)	64,8	-	-	41,7
Абразивность (%)	8,2	-	-	0,57



К водозаборам УП «Минскводоканал», в которых содержится повышенная концентрация железа (1,5–2 мг/л), относятся водозаборы № 2 «Петровщина», № 6 «Острова», № 8 «Вицковщина», № 9 «Водопой» и № 10 «Фелицианово». В июле 2016 года на водозаборе № 2 «Петровщина» и водозаборе № 8 «Вицковщина» были введены в эксплуатацию новые станции обезжелезивания.

Нами проведено обследование станций обезжелезивания на водозаборах № 8 и № 10, дан анализ и оценка эффективности технологий, применяемых на этих станциях.

На станции обезжелезивания водозабора № 10 «Фелицианово» установлены напорные фильтры для обезжелезивания воды производства ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» и фирмы «Culligan». Для удаления из воды железа на обеих установках используется метод упрощенной аэрации с последующим фильтрованием на комбинированной многослойной загрузке. Окисление железа осуществляется в толще фильтрующего слоя.

В результате анализа было установлено, что фильтры производства ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» и фирмы «Culligan» существенных отличий не имеют.

Для удаления железа на станции используется технология *Super Iron*, позволяющая удалять железо без добавления перманганата калия. Фильтрующее основание, которое состоит из минералов различного веса и размеров, обладает каталитическими свойствами, которые реактивируются путем впрыскивания окисляющего агента (на постоянной основе). Веществом-окислителем является сжатый воздух.

По полученным данным технологических изысканий обезжелезивания на водозаборе № 8 «Вицковщина» были выбраны напорные фильтры фирмы ООО «Евровода». Технические характеристики фильтрующих материалов представлены в таблице 2.

При обследовании водозаборов № 8 и № 10 УП «Минскводоканал» было установлено, что материалы фильтров на двух станциях различаются между собой, но все они обеспечивают удаление избыточного железа из воды. Водозабор № 10 уже длительное время подаёт воду с содержанием железа, соответствующим нормативам (менее 0,3 мг/л). Однако при проведении изысканий на водозаборе № 8 следует отметить более устойчивый режим работы установки ООО «Евровода» (таблица 3). Материалы и расположение слоёв фильтрующей загрузки на установке ООО «Евровода» подобраны весьма удачно, что позволяет эффективно удалять железо из исходной воды. Тем самым данный метод обезжелезивания демонстрирует относительную простоту в эксплуатации и высокую эффективность.

#### Заключение

Анализ методов обезжелезивания воды показал, что в Беларуси наиболее распространённым является метод упрощённой аэрации с последующим фильтрованием через зернистую загрузку или наполнители с каталитическими свойствами. Для очистки воды от взвеси и коллоидных веществ используют реагенты-коагулянты, среди которых чаще всего применяют сульфат алюминия. Для удаления из воды органического железа продуктивными являются методы на основе сорбции на слабоосновных

**Таблица 2. – Технические характеристики фильтрующих материалов**

ПАРАМЕТРЫ	ОПИСАНИЕ
Укрывной (поддерживающий) слой	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Кварцевый песок фракцией 5-10 мм</li> <li>• Высота слоя 100 мм</li> </ul>
Основной фильтрующий слой	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Кварцевый песок фракцией 0,6-0,8 мм</li> <li>• Высота слоя 587 мм</li> <li>• Масса загрузки на одной емкости не менее 4 т</li> </ul>
Природный материал на основе диоксида марганца	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Пиролюзит фракцией 0,35 – 0,85 мм</li> <li>• Высота слоя 270 мм</li> <li>• Содержание диоксида марганца (<math>MnO_2</math>) &gt; 80 %</li> <li>• Масса загрузки на одной емкости не менее 2,16 т</li> </ul>
Гидроантрацит	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Фракция 0,8-2,0 мм</li> <li>• Высота слоя в рабочем состоянии – 251 мм</li> <li>• Масса загрузки на одной емкости не менее 1,13 т</li> </ul>

Таблица 3. – Данные фильтров по технологическим изысканиям

	СЛОЙ	НПЦ НАН Беларуси по материа- ловедению	ООО «ЕВРОВОДА»	AS «Filter»	СООО «ВОДОЛЕЙ Ак- вариус»
<b>ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ</b>	№ 1	Песок кварцевый (640 мм)	Песок кварцевый	«Nevtraco» 1,0–2,5 мм (360 мм)	Песок кварцевый 1,4–2,0 мм;
	№ 2	Пиролюзит (275 мм)	Материал на основе диоксида марганца	«HydrolitMn» 1,0–3,0 мм «Гравий III» 0,8–1,4 мм (250 мм)	Кварцит 0,5–1,0 мм
	№ 3	Антрацит (240 мм)	Гидроантрацит	«Гравий А» 3,0–5,0 мм «Гравий С» 1,6–2,5 мм (360 мм)	Кварцит 0,4–1,2 мм
	№ 4	–	–	–	Пиролюзит 0,4–0,8 мм
	№ 5	–	–	–	Гидроантрацит 0,8–2 мм
<b>АНАЛИЗ ПРОБ НА СООТВЕТСТВИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖЕЛЕЗА РЕГЛАМЕНТУ</b>		<b>В 10 из 10 проб железо превысило норму</b>	<b>В 31 из 33 проб железо не превысило норму</b>	<b>В 8 из 33 проб железо не превысило норму</b>	<b>В 10 из 33 проб железо не превысило норму</b>

анионитах-органопоглотителях и окисление железа при помощи железобактерий.

При избыточном содержании железа на отдельных рассредоточенных водозаборах целесообразным является использование компактных мобильных установок с напорными фильтрами. Результаты исследований, проведенные на таких установках, на водозаборах № 8 «Вицковщина» и

№ 10 «Фелицианово» УП «Минскводоканал» показали, что они обеспечивают снижение концентрации железа до нормативного значения. Наиболее эффективной оказалась установка ООО «Евровода» на водозаборе № 8. Подбор фильтров, оптимальных по своим свойствам и параметрам, является важнейшим фактором, обеспечивающим эффективность работы установок по обезжелезиванию воды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Обезжелезивание и декарбонизация воды методом усиленной аэрации в струйных декарбонизаторах-обезжелезивателях «Кварк» [Электронный ресурс] / Промышленные энергосберегающие системы КВАРК. – Москва, 2013. – Режим доступа : <http://www.kwark.ru/files/articles/10001.pdf> – Дата доступа : 20.01.2017.
2. Johnson, R. Iron and Manganese Removal / R. Johnson // Water Quality Associate NDSU Extension Service, October 2013 [Электронный ресурс]: – Режим доступа : <https://www.ag.ndsu.edu/pubs/h2oqual/watsys/wq1030.pdf> – Дата доступа : 20.01.2017.
3. СанПиН 10-124 РБ 99 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» : Минск, 1999.
4. Ковалёв, А.Я. Еще раз об обезжелезивании воды / А.Я. Ковалёв – СПб : Журнал «Вода», сентябрь, 2003.

5. Гуринович, А.Д. Системы питьевого водоснабжения с водозаборными скважинами : планирование, проектирование, строительство и эксплуатация / А.Д. Гуринович.– Минск: УП «Технопринт», 2004 – 244 с.
6. Беликов, С.Е. Водоподготовка / С.Е. Беликов. – Москва: Издательский Дом «Аква-Терм», 2007 – 241 с.
7. ТКП 45-4.01-201-2010 Сооружения водоподготовки. Обезжелезивание подземных вод. Правила проектирования.: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011 – 71 с.
8. Degremont. Технический справочник по обработке воды. В 2 томах: перевод с французского – Спб. : Новый журнал, 2007. – 878 с.
9. Абрамов, Н.Н. Водоснабжение / Н.Н. Абрамов.– Москва: Стройиздат, 1974/ – 480 с.
10. Двойные фильтрационные системы [Электронный ресурс] / П.П. Дебелый, С.В. Новоженков. – Москва, 2002. – Режим доступа : <http://www.polymercon.ru/articles/839/> – Дата доступа : 20.01.2017.
11. Кулаков, В.В. Обезжелезивание и деманганация подземных вод / В.В. Кулаков, Е.В. Сошников, Г.П. Чайковский: Учебное пособие – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 100 с.
12. Ничипор, В.В. Рациональные методы и режимы обезжелезивания подземных вод / В.В. Ничипор. – Минск.: БелНИИТИ, 1991 – 20 с.
13. Коагулянты для очистки воды [Электронный ресурс] / SeptikLand – Москва, 2016 Режим доступа: <http://septikland.ru/vodosnabzhenie/ochistka-vody/koagulyanty-dlja-ochistki-vody.html> – Дата доступа : 20.01.2017.
14. IndionISR (ironspecificresin) [Электронный ресурс] : – Режим доступа: <http://www.ionresins.com/downloads/ISR%20bulletin-final.pdf> – Дата доступа : 20.01.2017
15. Hallberg, R.O. Vyredox - in-situ purification of ground water / R.O. Hallberg, R. J. Martinell // Ground water. – 1976. – Vol. 4 , 2.
16. Martinell, R. Controlled water treatment in the soil - in-situ removal of iron and manganese according to the Vyredox method / R Martinell. – Paris : IWSA, 1980.
17. Фрог, Б.П. Водоподготовка / Б.П. Фрог., А.П. Левченко – Москва : Издательство МГУ, 1996. – 680 с.
18. Николадзе, Г.И. Водоснабжение/ Г.И. Николадзе., М.А. Сомов – Москва: Стройиздат, 1995 – 690 с.
19. Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. В 3 томах. Том 2. Очистка и кондиционирование природных вод / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова; под общ. ред. М.Г. Журбы. – Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 493 с.
20. Сооружения водоподготовки. Строительные нормы проектирования. ТКП 45-4.01-31-2009. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2014 – 62 с.
21. Barloková, D. Removal of Iron and Manganese from Water Using Filtration by Natural Materials / D. Barloková\*, J. Plavský – Bratislava, Slovak University of Technology October, 2009 – 6 p.
22. Iron removal system «De-Iron» [Электронный ресурс]: Biovis Ltd, London, 2012 – Режим доступа : <http://www.biovis.co.uk/groundwater/iron-removal/> – Дата доступа : 20.01.2017.
23. Лемеш, М.И. Исследование биологического метода обезжелезивания подземных вод сложного состава / М.И. Лемеш, Ю.П. Седлухо : сб. науч. тр. Первая Восточноевропейская региональная конференция молодых ученых и специалистов водного сектора IWA БНТУ 21-22 мая 2009г. / Под общей редакцией А.Д. Гуриновича.– Минск, 2009. – с. 304-311.
24. Седлухо, Ю.П. Роль биологических процессов в технологиях очистки подземных вод / Ю.П. Седлухо, М.И. Лемеш // Вестник БНТУ. – 2008. – №1. – С.5-9.

Поступила 12.04.2017