

УДК 628.16.094.3-926.214:544.77

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖЕЛЕЗА И МАРГАНЦА В ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ВОДАХ ПРИ ОКИСЛЕНИИ ОЗОНОМ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОПОДГОТОВКИ

Шейнкман Л.Э., Дергунов Д.В., Савинова Л.Н., Четверикова А.Е.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, e-mail: dmitrov83@mail.ru

Рассмотрена возможность применения озона для очистки вод, загрязненных ионами железа и марганца. Показаны химические процессы, приводящие к окислению железа и марганца при озонировании воды. На основании экспериментальных исследований по воздействию озона на снижение концентрации ионов железа и марганца в подземных водах городов Салехард, Краснодар, Кемерово, выполненных профессором В.Л. Драгинским, установлены математические зависимости уровня снижения концентрации тяжелых металлов (Fe, Mn) от дозы озона. В программной среде Statistica 6.1 с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта определены МНК-оценки параметров экспоненциальных моделей, устанавливающих зависимость уровня остаточной концентрации железа и марганца в озонированной воде от дозы озона. В случае снижения концентрации железа значение параметра модели составляет $b_{Fe} = 0,028303$, для марганца – $b_{Mn} = 0,103852$. Значимость полученных моделей оценивалась с использованием критериев Фишера, t-критерия Стьюдента и 99%-ных доверительных интервалов. Значение коэффициента множественной корреляции для модели обезжелезивания составляет $R = 0,9618$, для модели деманганации – $R = 0,9512$. Математические модели адекватны результатам эксперимента на уровне значимости $\alpha = 0,01$. Согласно СНиП 2.04.02-84* метод обезжелезивания, расчетные параметры и дозы реагентов надлежит принимать на основе результатов технологических изысканий, выполненных непосредственно у источника водоснабжения. Дозы реагентов, определяемые по нормативным документам, являются теоретическими. Озон подвержен в воде каталитическому разложению, и его практическая доза обычно превышает расчетную. Полученные статистически значимые математические модели позволяют определять необходимую дозу озона для снижения концентраций железа и марганца в подземных и сточных водах до необходимого уровня.

Ключевые слова: озонирование, железо, марганец, подземные воды, сточные воды, моделирование

ESTABLISHMENT OF LAWS OF DECREASE IN CONCENTRATION OF IRON AND MANGANESE IN CONTAINING IRON WATERS AT OXIDATION BY OZONE FOR PERFECTION OF TECHNOLOGIES OF WATER PREPARATION

Sheynkman L.E., Dergunov D.V., Savinova L.N., Chetverikova A.E.

Tula State University, Tula, e-mail: dmitrov83@mail.ru

Possibility is considered of using ozone to purify water contaminated with ions of iron and manganese. Shows the chemical processes leading to the oxidation of iron and manganese during the ozonization of water. On the basis of experimental studies on the effects of ozone on reducing the concentration of ions of iron and manganese in the groundwater in the town of Salekhard, Krasnodar, Kemerovo, performed by Professor V.L. Draginsky, established mathematical relationships reduce the level of concentration of heavy metals (Fe, Mn) of the dose of ozone. In the software environment Statistica 6.1 using the Levenberg-Marquardt algorithm identified the estimates of the parameters of the exponential model establishes the dependence level of residual concentrations of iron and manganese in ozonated water from the ozone dose. In the case of reducing iron concentration value model is $b_{Fe} = 0,028303$, for manganese – $b_{Mn} = 0,103852$. The significance of the models was assessed using the criteria of Fisher, t-Student's test and 99% – confidence intervals. Value of the coefficient of multiple correlation model for iron removal of $R = 0,9618$, model demanganation – $R = 0,9512$. Mathematical models of the adequacy of the results of the experiment at a significance level $\alpha = 0,01$. According to the SNIP 2.04.02-84 * iron removal method, design parameters and doses of reagents to be taken based on the results of technological research carried out at the source of water supply. Doses of reagents defined by normative documents are theoretical. Ozone is subjected to the catalytic decomposition in water and its practical dose generally exceeds the calculated dose. These statistically significant mathematical models allow to determine the appropriate dose of ozone to reduce the concentrations of iron and manganese in groundwater and wastewater to the required level.

Keywords: ozonation, iron, manganese, groundwater, wastewater, modeling

Многие поверхностные и подземные водоисточники характеризуются повышенными концентрациями железа и марганца. Главными источниками появления соединений железа в природных водах являются процессы выветривания, эрозии почв и растворения горных пород. Значительные количества железа поступают с подземными

водами, со сточными водами промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий. Глобальный характер приобретает закисление поверхностных и подземных вод из-за выпадения кислых дождей. В кислых водных средах на базе системы $Fe^{2+} - Fe^{3+} - SO_4^{2-}$ образуется целый ряд соединений железа, характеризующихся

различной растворимостью. В питьевой воде железо может присутствовать также вследствие использования на муниципальных станциях очистки воды железосодержащих коагулянтов, которые применяют для осветления поступающей воды, либо из-за коррозии водопроводных труб [10].

Соединения железа в природной воде могут находиться в растворенном, коллоидном и взвешенном состоянии в зависимости от валентности, а также в виде различных химических соединений. Двухвалентное железо почти всегда находится в воде в растворенном состоянии, трехвалентное – только в случае очень низкого значения pH [2, 8, 10]. В подземных грунтовых водах концентрация железа колеблется в пределах от 0,5 до 50 мг/л. В центральном российском регионе, включая Подмоскowie, эта величина изменяется в диапазоне 0,3–10 мг/л, наиболее часто – 3–5 мг/л, в зависимости от географического местоположения и глубины источника [2]. При высоких концентрациях железо негативно влияет на здоровье человека, накапливаясь в печени, способствует разрушению ее клеток, а также вызывает аллергические реакции, которые могут привести к заболеваниям крови [10]. Согласно принятым санитарным нормам [11] концентрация общего железа в водопроводной воде не должна превышать 0,3 мг/л, марганца – 0,1 мг/л, поскольку это тяжелые металлы, и наряду с марганцем, никелем, хромом, мышьяком, кадмием, свинцом и медью относятся к высокотоксическим и долго сохраняющимся в природе веществам. Часто концентрация железа в водопроводной воде превышает норму в 5, 10 и более раз, поэтому проблема обезжелезивания воды стоит особенно остро [7, 10].

Традиционный подход к очистке подземных вод от растворенных форм железа и марганца предусматривает технологическое решение, реализуемое в две стадии: на первой ступени обработки – окисление двухвалентного железа до коллоидного состояния и извлечение его из системы; на второй ступени – последующее окисление в предварительно обезжелезенной воде растворенного марганца и его осаждение в фильтрующей загрузке фильтров. В данной технологии, нашедшей широкое распространение в практике очистки воды, существует необходимость применения реагентов (гипохлорита натрия, перекиси водорода, озона и др.) [1].

Наиболее сильным окислителем, широко используемым на практике, является озон, поскольку может быть использован для обеззараживания, обесцвечивания, дехлорации воды, для удаления соединений

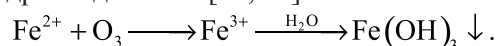
железа и марганца. Озон обладает высоким бактерицидным и вирулицидным действием, высокой степенью окисления органических веществ. Озон не придает воде запаха и привкуса. Окислительный потенциал озона – 1,95 В [2, 13, 14].

В технологии озонирования воды основным фактором, влияющим на уровень снижения концентрации тяжелых металлов, является доза озона [7, 8, 14].

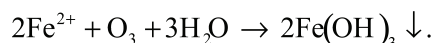
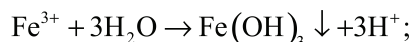
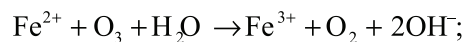
Целью работы является установление закономерностей снижения концентрации железа и марганца в железосодержащих водах при окислении озоном для совершенствования технологий водоподготовки.

С помощью озона в сточных водах могут быть окислены неорганические анионы и катионы, среди которых цианиды, нитриты, сульфиды, сульфиты, тиосульфаты, катионы Mn (II), железа (II), Hg (I), мышьяк, алюминий, свинец, никель, хром, медь, кобальт, барий, цинк, кадмий и органические комплексы некоторых из этих металлов.

В процессе воздействия озона двухвалентное железо окисляется до трехвалентного. В трехвалентном состоянии ион железа гидролизует, образуя нерастворимый гидроксид железа [16, 18]:

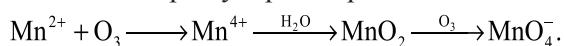


Процесс окисления двухвалентного железа может быть представлен схемой [7, 9]:

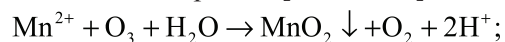


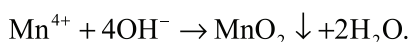
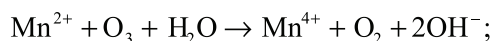
Окисление марганца более сложный процесс. Растворенный в воде двухвалентный марганец в результате контакта с кислородом при низком pH окисляется медленно. При окислении марганец остается в растворе в виде коллоидного гидроксида, который коагулирует в соответствующей среде.

Озонирование иона марганца приводит к образованию нерастворимого диоксида марганца, который осаждается гораздо быстрее гидроксида железа. При продолжении озонирования водных растворов марганца может образовываться ион перманганата, имеющий хорошую растворимость:

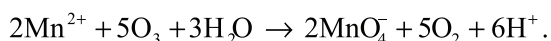


Марганец может также образовывать растворимые комплексы с бикарбонатами и сульфатами. В области pH = 5–7 при воздействии озона имеет место образование четырехвалентной окиси марганца [7, 9, 15, 17]:





При использовании озона важно контролировать дозу окислителя. Чрезмерные дозы озона, особенно в кислых средах, могут привести к образованию перманганата (MnO_4^-), в соответствии со следующей реакцией:



Перманганат – вещество, в котором марганец представлен в своей высшей степени окисления, Mn^{7+} . Теоретическая стехиометрия для проведения реакции составляет 2,2 мг O_3 /мг Mn^{2+} . Перманганат является нежелательным продуктом реакции в области очистки воды с использованием озонирования. Это вещество с относительно длительным периодом полураспада, определяющее цветность воды. Образовавшийся MnO_2 , как правило, гидратируется в водной среде в $\text{Mn}(\text{OH})_2$ [15, 17].

Стехиометрически доза озона на окисление двухвалентного железа определяется в соответствии с выражением [2]

$$D_{\text{O}_3} = 0,14 \cdot [\text{Fe}^{2+}],$$

где D_{O_3} – доза озона, мг/л; $[\text{Fe}^{2+}]$ – концентрация двухвалентного железа в исходной воде, мг/л.

Согласно СНиП 2.04.02-84* [12] метод обезжелезивания, расчетные параметры и дозы реагентов надлежит принимать на основе результатов технологических изысканий, выполненных непосредственно у источника водоснабжения.

Применение озона позволяет вести процесс деманганации при значениях рН, равных 8,0–8,5. При обработке воды озон процесс окисления марганца завершается в течение 10–15 минут при значении рН воды 6,5–7,0. Доза озона по стехиометрии составляет 1,45 мг O_3 на 1 мг двухвалентного марганца [2]. Согласно исследованиям [7] при озонировании воды происходит практически полное окисление двухвалентного железа и марганца, при удельном расходе озона до 4 мг на 1 мг марганца и 0,12 мг/л на окисление 1 мг железа. Однако при озонировании воды озон подвержен каталитическому разложению оксидами марганца, поэтому доза озона должна быть увеличена. Указанные количества озона для окисления железа и марганца в воде – теоретические. Практически

доза O_3 зависит от значения рН, времени контакта окислителя с водой, от образующихся отложений, содержания органических веществ, конструкции аппаратов и могут составить увеличение по сравнению с теоретическими количествами озона в 1,5–5 раз [2]. Таким образом, учитывая эколого-экономический аспект озонирования, важной задачей в технологии очистки воды является определение необходимой дозы озона на основе моделирования процессов снижения концентраций железа и марганца.

Экспериментальные исследования по воздействию озона на снижение концентрации ионов железа и марганца для целей очистки подземных вод в городах Салехард, Краснодар, Кемерово, Мегион проводились исследователями под руководством д.т.н., проф. В.Л. Драгинского, д.т.н., проф. В.В. Дзюбо [5–8], а также рядом отечественных и зарубежных ученых [1, 3, 4, 13, 14–18]. Экспериментальные установки состояли из блоков окисления воды озонном и фильтровальных колонок с песчаной и угольной загрузкой. В процессе исследований изменяли дозы озона от 0 до 7 мг/л, рН воды, скорость фильтрования [7, 8]. При озонировании воды эффективность удаления железа зависит от дозы озона: чем выше доза озона, тем меньше остаточная концентрация железа в очищенной воде. При небольших концентрациях двухвалентного железа (до 7 мг/л) полное его окисление достигается при дозе озона 0,6 мг/л; при более высоких концентрациях (до 15 мг/л и более) необходимая доза озона составляла 1,7–2,5 мг/л. На глубину очистки воды от железа также влияет время контакта воды с озонном. При использовании озона и последующем фильтровании через песчаный фильтр в экспериментальных исследованиях [7] обеспечивалось снижение концентрации железа до 0,3 мг/л при дозе озона 1 мг/л. Результаты эксперимента представлены в таблице.

При построении математической модели, связывающей уровень снижения концентрации железа в воде с дозой озона по экспериментальным данным (таблица), воспользуемся экспоненциальным уравнением вида

$$[\text{Fe}]_t / [\text{Fe}]_0 = \exp(-b \cdot D[\text{O}_3]), \quad (1)$$

где $[\text{Fe}]_t$ – концентрация железа на момент окончания озонирования (остаточная концентрация), мг/л; $[\text{Fe}]_0$ – начальная концентрация железа, мг/л; b – оцениваемый параметр модели; $D[\text{O}_3]$ – доза озона, мг/л.

Изменение концентрации железа и марганца при очистке воды [7]

Доза озона, мг/л	Концентрация загрязнителей, мг/л			
	До фильтрации		После фильтрации	
	Fe _{общ}	Mn	Fe _{общ}	Mn
0	1,2	0,3	1,2	0,3
0,9	1,2	0,27	0,32	0,29
1,8	1,15	0,29	0,26	0,23
3,0	1,07	0,23	0,12	0,04
4,0	1,08	0,19	0,07	0,04
5,0	1,06	0,17	0,06	0,02
6,0	1,0	0,15	0	0

В программной среде Statistica 6.1 алгоритмом Левенберга – Марквардта с использованием метода наименьших квадратов идентифицировано выражение вида (1), устанавливающее зависимость снижения концентрации железа в водной среде от дозы озона:

$$[\text{Fe}]_t / [\text{Fe}]_0 = \exp(-0,028303D[\text{O}_3]); \quad (2)$$

$$[\text{Fe}]_t = [\text{Fe}]_0 \exp(-0,028303D[\text{O}_3]).$$

Статистическая значимость модели (2) подтверждается на уровне $\alpha = 0,01$ высоким коэффициентом множественной корреляции $R = 0,9618$, уровень доли объясненной дисперсии 0,925. Расчетное значение критерия Фишера $F(1,6) = 19821,65$ превышает критическое значение $-F_{\text{кр}}(0,01; 1,6) = 13,745$, подтверждает значимость коэффициента множественной корреляции R на уровне $\alpha = 0,01$. Адекватность параметра модели $b = 0,028303$ проверялась с использованием t-критерия Стьюдента. Расчетное значение t-критерия для параметра b составляет $t\{b\} = 13,47$. Расчетное значение t-критерия Стьюдента превышает критическое значение $t_{\text{кр}}(0,01; 6) = 3,143$, чем подтверждает значимость полученной оценки параметра b на уровне $\alpha = 0,01$. Стандартная ошибка оценки составляет $St_{\text{err}}\{b\} = 0,002101$, что также является показателем надежности рассчитанного параметра. Определен 99%-й доверительный интервал для параметра b : (0,020513; 0,036094). Полученная оценка параметра b принадлежит 99%-му доверительному интервалу, что отражает надежность и адекватность полученного значения 0,028303.

По аналогии с моделью (1) установлена зависимость снижения концентрации марганца от дозы озона:

$$[\text{Mn}]_t / [\text{Mn}]_0 = \exp(-0,103852D[\text{O}_3]); \quad (3)$$

$$[\text{Mn}]_t = [\text{Mn}]_0 \exp(-0,103852D[\text{O}_3]).$$

Статистическая значимость модели (3) подтверждается на уровне $\alpha = 0,01$ высоким коэффициентом множественной корреляции $R = 0,9512$, уровень объясненной доли дисперсии 0,9048. Расчетное значение критерия Фишера $F(1,6) = 1119,709$, превышающее критическое значение $-F_{\text{кр}}(0,01; 1,6) = 13,745$, определяет значимость коэффициента множественной корреляции на уровне $\alpha = 0,01$.

Адекватность параметра модели $b = 0,103852$ также проверялась с использованием t-критерия Стьюдента. Расчетное значение t-критерия $t\{b\} = 9,778731$ превышает критическое значение $t_{\text{кр}}(0,01; 6) = 3,143$, чем подтверждает значимость полученной оценки параметра b на уровне $\alpha = 0,01$. Стандартная ошибка оценки, определенная на уровне $St_{\text{err}}\{b\} = 0,01062$, является показателем надежности рассчитанного параметра. Определен 99%-й доверительный интервал для параметра b : (0,064479; 0,143226). Полученная оценка параметра b принадлежит 99%-му доверительному интервалу, что отражает надежность и адекватность полученного значения 0,103852.

Зависимости снижения концентраций железа и марганца в соответствии с моделями (2, 3) приведены на рис. 1, 2.

Доза озона зависит от назначения озонированной воды. Если озон вводят только для обеззараживания в фильтрованную воду (после её предварительного коагулирования и осветления), то дозу озона принимают 1–3 мг/л, для подземной воды – 0,75–1 мг/л, при введении озона для обесцвечивания и обеззараживания загрязненной воды доза озона может достигать до 5 мг/л. Продолжительность контакта обеззараживаемой воды с озонном – 8–12 мин [2].

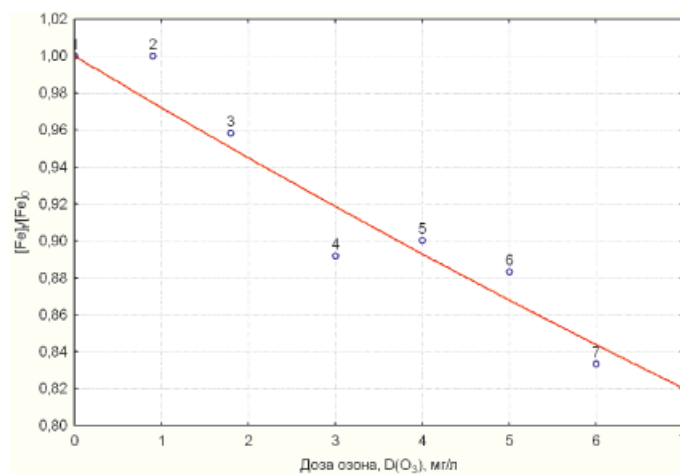


Рис. 1. Зависимость снижения уровня концентрации железа от дозы озона

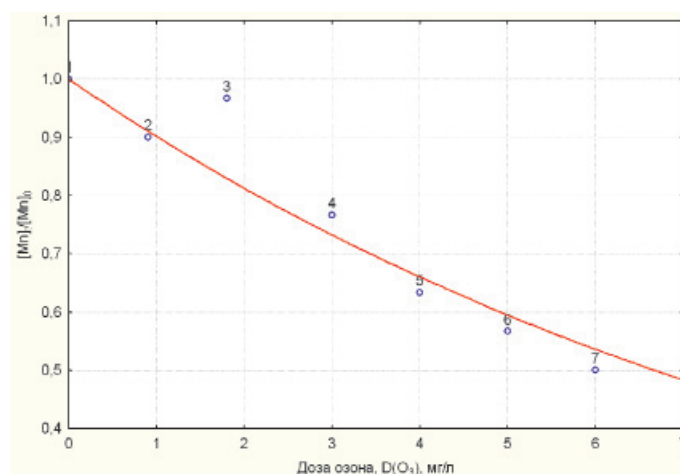


Рис. 2. Зависимость снижения уровня концентрации марганца от дозы озона

Полученные математические зависимости, отражающие связь дозы озона с уровнем снижения концентрации железа и марганца в обрабатываемой воде, направлены на определение дозы, необходимой для очистки железосодержащих вод, с различным содержанием тяжелых металлов. Установление дозы озона для снижения концентрации железа и марганца до требуемого уровня в воде с разным количественным составом загрязнителей позволит повысить эффективность процесса водоочистки и оптимизировать затраты на технологию озонирования.

Список литературы

1. Аскерния А.А., Корабельников Л.В., Моисеев А.В., Гераськов С.С., Павлюченко Д.И., Бодягин А.О. Особенности выбора методов одноступенчатого обезжелезивания и деманганации подземных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 1. – С. 22–28.
 2. Беликов С.Е. Водоподготовка: Справочник. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.

3. Бо Д., Герасимов Г.Н. Практика озонирования в обработке питьевых вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 26–29.
 4. Гордеев М.Б., Колодяжный В.А. Обезжелезивание природных вод озонированием в присутствии пероксида водорода // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 6. – С. 22–25.
 5. Дзюбо В.В., Алферова Л.И. Озонирование при обезжелезивании-деманганации подземных вод в Сибирском регионе // Вода: химия и экология. – 2011. – № 5. – С. 25–32.
 6. Дзюбо В.В., Алферова Л.И. Особенности технологии озонирования Mn-содержащих подземных вод // Водоочистка. – 2013. – № 12. – С. 59–65.
 7. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. Озонирование в процессах очистки воды. – М., ДеЛи принт, 2007. – 400 с.
 8. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П. Очистка подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. – № 12. – С. 16–19.
 9. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.
 10. Мамченко А.В., Мисочка И.В., Дешко И.И., Кий Н.Н., Герасименко Н.Г. Приоритетные направления

в технологии очистки подземных вод от железа // Химия и технология воды. – 2009. – Т. 31. – № 1. – С. 57–77.

11. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. – 103 с.

12. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Минстрой России. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 128 с.

13. Юрмазова Т.А., Шиян Л.Н., Мачехина К.И. Определение кинетических параметров реакций окисления железосодержащих подземных вод озонном и кислородом воздуха для технологий водоподготовки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: www.science-education.ru/119-14536 (дата обращения: 08.04.2015).

14. C. Gottschalk, J.A. Libra, A. Saupe. Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Application. WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2000.

15. Dean Gregory, Kenneth H. Carlson. Ozonation of Dissolved Manganese in the Presence of Natural Organic Matter // Ozone: Science & Engineering, (2001) 23: 2, P. 149–159. DOI: 10.1080/01919510108961997.

16. Rip G. Rice, Myron E. Browning, Robert S. Kerr. Ozone for industrial water and wastewater treatment: A literature survey. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 1980. 376 p.

17. Sallanko, Jarmo, Lakso, Esko and Lehmikangas, Marko. The Effect of Ozonation on the Size Fractions of Manganese // Ozone: Science & Engineering, (2005) 27: 2, P. 147–151. DOI: 10.1080/01919510590925266.

18. Sallanko, Jarmo, Lakso, Esko and Röpölinen, Jyrki. Iron Behavior in the Ozonation and Filtration of Groundwater // Ozone: Science & Engineering, (2006). 28:4, P. 269–273. DOI: 10.1080/01919510600721795.

References

1. Askernija A.A., Korabelnikov L.V., Moiseev A.V., Geraskov S.S., Pavljuchenko D.I., Bodjagin A.O. Osobennosti vybora metodov odnostupenchatogo obezhezhelevaniya i demanganacii podzemnyh vod // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2015. no. 1. pp. 22–28.

2. Belikov S.E. Vodopodgotovka: Spravochnik. M.: Akva-Term, 2007. 240 p.

3. Bo D., Gerasimov G.N. Praktika ozonirovaniya v obrabotke pitevyh vod // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2000. no. 1. pp. 26–29.

4. Gordeev M.B., Kolodjazhnyj V.A. Obezhezhelevanie prirodnyh vod ozonirovaniem v prisutstvii peroksida vodoroda // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika. 2010. no. 6. pp. 22–25.

5. Dzjubo V.V., Alferova L.I. Ozonirovanie pri obezhezhelevanii-demanganacii podzemnyh vod v Sibirskom regione // Voda: himija i jekologija. 2011. no. 5. pp. 25–32.

6. Dzjubo V.V., Alferova L.I. Osobennosti tehnologii ozonirovaniya Mn-soderzhashhih podzemnyh vod // Vodoochistka. 2013. no. 12. pp. 59–65.

7. Draginskij V.L., Alekseeva L.P., Samojlovich V.G. Ozonirovanie v processah ochistki vody. M., DeLi print, 2007. 400 p.

8. Draginskij V.L., Alekseeva L.P. Ochistka podzemnyh vod ot soedinenij zheleza, marganca i organicheskikh zagraznenij // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnika. 1997. no. 12. pp. 16–19.

9. Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N. Fizicheskaja himija ozona. M.: Izd-vo MGU, 1998. 480 p.

10. Mamchenko A.V., Misochka I.V., Deshko I.I., Kij N.N., Gerasimenko N.G. Prioritetnye napravlenija v tehnologii ochistki podzemnyh vod ot zheleza // Himija i tehnologija vody. 2009. T. 31. no. 1. pp. 57–77.

11. SanPiN 2.1.4.1074-01. Pitevaja voda. Gigienicheskie trebovanija k kachestvu vody centralizovannyh sistem pitevogo vodospabzhenija. Kontrol kachestva. Sanitarно-jepidemiologicheskie pravila i normativy. M.: Federalnyj centr gossanjepidennadzora Minzdrava Rossii, 2002. 103 p.

12. SNiP 2.04.02-84*. Vodospabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzhenija / Minstroj Rossii. M.: GP CPP, 1996. 128 p.

13. Jurmazova T.A., Shijan L.N., Machehina K.I. Opredelenie kineticheskikh parametrov reakcij okislenija zhelezosoderzhashhih podzemnyh vod ozonom i kislородом vozduha dlja tehnologij vodopodgotovki // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 5; URL: www.science-education.ru/119-14536 (data obrashhenija: 08.04.2015).

14. C. Gottschalk, J.A. Libra, A. Saupe. Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Application. WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2000.

15. Dean Gregory, Kenneth H. Carlson. Ozonation of Dissolved Manganese in the Presence of Natural Organic Matter // Ozone: Science & Engineering, (2001) 23: 2, pp. 149–159. DOI: 10.1080/01919510108961997.

16. Rip G. Rice, Myron E. Browning, Robert S. Kerr. Ozone for industrial water and wastewater treatment: A literature survey. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 1980. 376 p.

17. Sallanko, Jarmo, Lakso, Esko and Lehmikangas, Marko. The Effect of Ozonation on the Size Fractions of Manganese // Ozone: Science & Engineering, (2005) 27: 2, pp. 147–151. DOI: 10.1080/01919510590925266.

18. Sallanko, Jarmo, Lakso, Esko and Röpölinen, Jyrki. Iron Behavior in the Ozonation and Filtration of Groundwater // Ozone: Science & Engineering, (2006). 28:4, pp. 269–273. DOI: 10.1080/01919510600721795.

Рецензенты:

Субботина Т.И., д.м.н., доцент, заведующая кафедрой «Общая патология», Медицинский институт, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула;

Радченко С.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры технологии и сервиса, ФГБОУ ВПО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», г. Тула.