

doi: 10.5862/MCE.55.5

Контактное обезжелезивание подземных вод в системах сельскохозяйственного водоснабжения

*Аспирант О.Ю. Поберезниченко,
Институт водных проблем и мелиорации НААН*

Аннотация. На предприятии агропромышленного комплекса авторами была сконструирована экспериментальная установка контактного обезжелезивания подземных вод с биореактором и пенополистирольным фильтром для обеспечения нормативного содержания железа в питьевой воде. Разработана методика расчета конструктивных и технологических параметров фильтров для обеспечения минимальных капитальных и эксплуатационных затрат при нормативных показателях качества очищенной воды.

На основе экспериментальных исследований были определены зависимости между скоростью фильтрации воды и продолжительностью фильтрования, и между скоростью фильтрации и продолжительностью зарядки фильтра (а значит, и полезной работы фильтра).

Исследованы эффективность обезжелезивания воды и потери напора на фильтре по отношению к удельной грязеемкости фильтра и скорости фильтрования. Определена минимальная удельная грязеемкость фильтра для экспериментальной установки.

Ключевые слова: подземные воды; водообезжелезивание; биореактор; пенополистирольная загрузка

Введение

Обеспечение населения качественной водой – важная проблема современности. Из всех видов водных ресурсов наиболее ценными для водоснабжения являются подземные пресные воды, так как они намного чище поверхностных, их сток более стабильный, а качество практически не зависит от сезонных изменений. Значительная часть подземных вод горизонтов Украины и России имеют повышенное содержание ионов железа, которое колеблется от 0,5 мг/л до 30 мг/л и более, и требуют обезжелезивания. Согласно ДСанПин 2.2.4-171-10, который действует в Украине, концентрация железа в питьевой воде должна быть не больше 0,2 мг/л. В России действует СанПиН 2.1.4.1074-01, согласно которому концентрация железа должна составлять не более 0,3 мг/л.

Фильтрование является обязательной технологической операцией в процессе обезжелезивания воды. При фильтровании воды через фильтры с тяжелой загрузкой вода движется сверху вниз. При задержании железа на поверхности зерен фильтрующей загрузки образуется каталитическая пленка из ионов и оксидов двух- и трехвалентного железа, которая активно интенсифицирует процессы окисления и удаления железа из воды. Данная технология имеет следующие недостатки: колюматрируется фильтровальная загрузка, а следовательно, ее нужно разрыхлять или применять сжатый воздух для разрыхления; требуется применение компрессора аэрации воды и промывки фильтров, что увеличивает общие затраты энергии.

Для сельской местности важно иметь простую и компактную установку, которая будет обеспечивать необходимую степень очистки воды и работать в автоматическом режиме [1, 2, 3]. Из анализа известных методов обезжелезивания воды видно, что достаточно хорошо зарекомендовали себя пенополистирольные фильтры с восходящим потоком воды [4–7]. Преимущества пенополистирольного фильтра по сравнению с фильтром с тяжелой загрузкой следующие:

- простота эксплуатации;
- оптимальное соотношение производительности и размера;
- промывка загрузки не требует специальных промывочных насосов или водонапорных башен;
- меньшие строительные затраты;
- на промывку загрузки требуется меньший объем воды.

Поэтому необходимо детально изучать именно это направление очистки природных вод от ионов железа.

Обзор литературы

Вопросами обезжелезивания подземных вод интересовались ученые различных стран, которые посвятили данной проблеме многочисленные труды и исследования: Г.И. Николадзе, Л.П. Румянцева, Е.Ф. Золотова, Г.Ю. Асс, К.А. Мамонтова, И.Е. Апельцина, В.А. Клячко, О.Я. Олийнык, П.Д. Хоружий, Ю.А. Тарасевич, М.А. Сафонова, С.Ю. Мартинов [7], М.Г. Журба [8, 9], В.О. Орлов [5], и др. [10, 11, 12]. Несмотря на большое количество работ, посвященных обезжелезиванию воды [14–19], практически отсутствуют разработки простых, надежных и экономичных установок обезжелезивания воды.

Для обезжелезивания воды рекомендуются следующие методы:

- 1) безреагентные;
- 2) реагентные, в которых искусственно подают реагенты;
- 3) биохимические, в которых основную роль в удалении железа из воды играют железобактерии (аэробные и анаэробные).

Задачей всех методов является перевод растворимых форм железа $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ в малорастворимую форму $\text{Fe}(\text{OH})_3$, что достигается окислением с последующим задержанием в отстойниках или фильтрах.

Постановка задачи

Задачей настоящей статьи является создание водообезжелезивающей установки и определение ее оптимальных конструктивных и технологических параметров, а именно: высоты и плотности упаковки волокнистой загрузки биореактора (БР), диаметров гранул, коэффициента неоднородности и высоты пенополистирольной загрузки контактного осветительного фильтра (КОФ), скорости фильтрования воды на БР и КОФ и продолжительности фильтроцикла, интенсивности и продолжительности промывки фильтров.

Методика экспериментальных исследований

Как известно, качество очищенной воды и потери напора на фильтрах зависят от качества исходной воды, характеристики фильтрующего материала, степени его закольматованности осадком и скорости фильтрования воды [20–28]:

$$C_{ф.и.} = C_{с.и.}; d_e; K_n; l_{ф.}; V_{ф.и.}; G_u, \quad (1)$$

$$h_{ф.и.} = \varphi d_e; K_n; l_{ф.}; V_{ф.и.}; G_u, \quad (2)$$

где $C_{ф.и.}$ та $C_{с.и.}$ – содержание железа в фильтрованной и исходной воде соответственно, мг/дм³; d_e и K_n – эквивалентный диаметр, мм, и коэффициент неоднородности частиц фильтровальной загрузки; $l_{ф.}$ – толщина засыпки фильтра, м; $V_{ф.и.}$ – скорость фильтрования воды, м/час; $h_{ф.и.}$ – потери напора на фильтре, м; G_u – удельная грязеемкость фильтра в данный момент (u -й), кг/м², то есть количество задержанного гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, кг, приходящегося на 1 м² площади фильтра.

Математические зависимости выражений 1 и 2 могут быть установлены только на основе экспериментальных исследований, оптимальное количество которых в многофакторных зависимостях определяли методом Бокса – Уилсона [29], идея которого заключается в том, что экспериментатор выполняет небольшие серии опытов и в каждой из серий все факторы одновременно изменяются по определенным правилам.

При планировании экспериментов факторы поддерживали постоянными в течение данного опыта: конструктивные параметры (d_e ; K_n ; $l_{ф.}$), качество исходной воды $C_{с.и.}$, скорость фильтрования $V_{ф.и.}$. Все факторы должны быть однозначными, совместимыми и независимыми. Опыт проводили при постоянном режиме работы установки. Число значений каждого фактора должно быть не менее трех, а погрешности всех измерений – одного порядка, так как неточное измерение только одной из величин обесценивает большую точность измерений всех остальных.

Методика измерения исследуемых параметров

Экспериментальные исследования проводили на установке, схема которой показана на рисунке 1. Данная схема отображает процессы обезжелезивания вод биологическим методом.

Поберезниченко О.Ю. Контактное обезжелезивание подземных вод в системах сельскохозяйственного водоснабжения

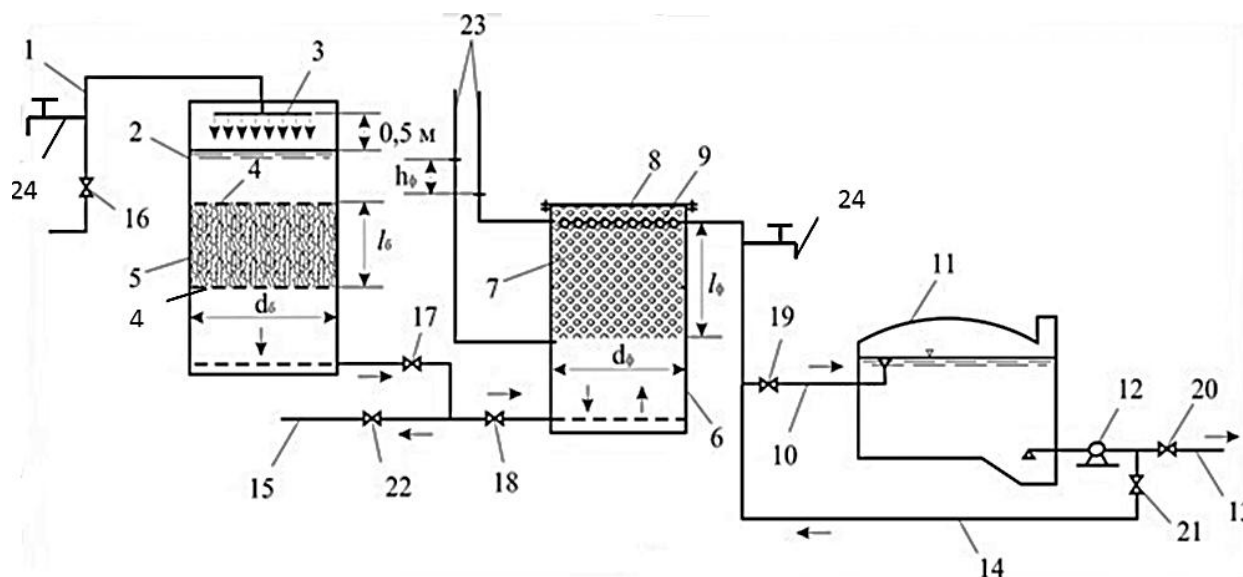


Рисунок 1. Технологическая схема установки для обезжелезивания воды на БР и КОФ:
 1 – подача исходной воды; 2 – БР; 3 – аэратор; 4 – решетки; 5 – волокнистая загрузка; 6 – КОФ; 7 – пенополистирольная загрузка; 8 – крышка; 9 – колпачковый дренаж; 10 – отвод очищенной воды; 11 – РЧВ (резервуар чистой воды); 12 – насосная станция; 13 – подача воды потребителям; 14 – подача воды на промывку; 15 – сброс промывной воды; 16–22 – задвижки; 23 – пьезометрические трубки; 24 – пробоотборники

Водообезжелезивающая установка работает следующим образом.

Подземная вода по трубе 1 через аэратор 3 подается на БР с волокнистой загрузкой 5, которая прикрепляется в натянутом состоянии между решетками 4.

Вода в аэраторе, как в душевой сетке, разбрызгивается на мельчайшие капли, которые падают вниз с высоты не менее 0,5 м, что способствует насыщению воды кислородом и выделению из нее углекислого газа CO_2 и других газов для предотвращения пузырьковой коагуляции нижнего слоя фильтровальной загрузки КОФ. В волокнистой загрузке 5 происходит биохимическое окисление двууглекислого железа $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ с помощью микроорганизмов, которые прикрепляются к поверхности нитей загрузки с образованием хлопьев из гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

БР обеспечивает также постоянную скорость фильтрования воды в течение фильтроцикла: при увеличении потерь напора на сооружениях автоматически поднимается уровень воды в БР.

На КОФ происходит глубокое очищение воды при ее восходящем движении через пенополистирольную загрузку. На дне подфильтрового пространства накапливается осадок из хлопьев оксидов железа, который дополнительно участвует в очистке воды как осветитель с зависшим осадком. Очищенная вода собирается колпачковым дренажом 9 и по трубопроводу 10 отводится в резервуар чистой воды (РЧВ) 11, из которого она насосной станцией 12 по трубопроводу 13 подается потребителям.

В период фильтрования воды открываем задвижки 16–20, а задвижки 21 и 22 оставляем закрытыми. При промывке КОФ закрываем задвижки 16, 17, 19 и 20 и открываем задвижки 21 и 22. Вода подается по трубопроводу 14 через колпачковый дренаж 9 и движется в КОФ обратно (сверху вниз), вымывая загрязнения из пенополистирольной загрузки 7 и ее подфильтрового пространства. Промывочная вода сбрасывается по трубопроводу 15.

Промывка БР 2 осуществляется при опорожнении фильтра с помощью гидравлического эффекта, связанного с турбулентным движением воды в процессе расширения загрузки при промывке. Промывка осуществляется следующим образом: закрываем задвижки 16 и 18, открываем задвижки 17 и 22. Вода самотеком вытекает из фильтра по трубопроводу 15.

Оптимальные конструктивные и технологические параметры БР и КОФ следует определять на основе экспериментальных исследований для обеспечения минимальных капитальных и эксплуатационных затрат при нормативных показателях качества очищенной воды.

Содержание железа в воде $C_{в.и}$ и $C_{ф.}$, мг/дм³, определяли по ДСТУ ISO 6332:2003 «Определение железа спектрометрическим методом» [30].

Массовую концентрацию железа находили с помощью калибровочного графика и рассчитывали по формуле:

$$X = C \cdot 50 / V, \text{ мг/дм}^3, \quad (3)$$

где C – концентрация железа, найденная с помощью калибровочного графика, мг/дм³; V – объем раствора, взятого для определения содержания железа, мл.

Потери напора $h_{ф.}$ определяли с точностью 1 мм с помощью пьезометра 23 (рис.1), который подключали перед фильтровальной загрузкой и после.

Длина пути фильтрации воды между точками подключения пьезометра измерялась линейкой с точностью 1 мм.

Расход воды, проходящей через фильтр, рассчитывали по формуле:

$$Q_{ф.и.} = W_{ф.и.} / t_u, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4)$$

где $W_{ф.и.}$ – объем воды, который профильтровали через установку по u -й цикл измерений, м³; t_u – длительность u -го цикла работы установки, год. Точность измерений $W_{ф.и.}$ – 0,01 л; t_u – 1 с.

Скорость фильтрования воды рассчитывали по формуле:

$$V_{ф.и.} = 4Q_{ф.и.} / \pi d_{ф.}^2, \text{ м/ч}, \quad (5)$$

где $d_{ф.}$ – диаметр фильтра, м. Значение $V_{ф.и.}$ измерялись с точностью 0,1 м/ч.

Для каждого цикла опытов все измерения выполнялись при постоянной скорости фильтрования, то есть когда выполнялось требование, чтобы для u -го цикла скорость фильтрования $V_{ф.и.} = \text{const}$, а ее величину регулировали вентилем 16 (рис.1).

Интенсивность промывки фильтра рассчитывали по формуле:

$$q_{пр.и.} = 4Q_{пр.и.} / \pi d_{ф.}^2, \text{ л/с} \cdot \text{м}^2, \quad (6)$$

где $Q_{пр.и.}$ – расход воды на промывку фильтра, л/с, который рассчитывали по формуле (4). Интенсивность промывки измеряли с точностью 0,1 л/с·м² и регулировали вентилем 21 (рис.1).

Продолжительность фильтроцикла $T_{ф.}$, то есть время работы фильтра между его промывками, и продолжительность промывки определяли с точностью 0,01 ч.

Эффективность обезжелезивания воды определялась по формуле:

$$E_u = \frac{C_{в.} - C_{ф.}}{C_{в.}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Накопление загрязнений в фильтре за измерительный интервал времени определяли как:

$$\Delta G_u = \frac{K_n V_{ф.} C_{в.} E_{ср.и.} \Delta T_{ф.}}{1000}, \text{ кг/м}^2, \quad (8)$$

где K_n – переводной коэффициент, учитывающий отношение молекулярной массы гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ к атомной массе двухвалентного железа:

$$K_n = \frac{M[\text{Fe OH}_3]}{A\text{Fe}^{2+}} = \frac{107}{56} = 1,91; \quad (9)$$

$V_{ф.}$ – скорость фильтрования воды, м/ч; $C_{в.}$ – содержание железа в исходной воде, мг/дм³; $E_{ср.и.}$ – средняя эффективность обезжелезивания воды в течение соответствующего измерительного периода, в долях единицы; $\Delta T_{ф.}$ – продолжительность этого периода, час.

Удельную грязеемкость фильтра определяли как последовательную сумму величин $\Delta G_{n,i}$ от начала фильтроцикла и к данному (j-му) моменту времени:

$$G_{n,j} = \sum_0^{T_{\phi,j}} \Delta G_{n,i}, \text{ кг/м}^2. \quad (10)$$

Коэффициент фильтрации пенополистирольной загрузки определяется по формуле:

$$K_{\phi,u,j} = V_{\phi,j} l_{\phi} / h_{\phi,u,j}, \text{ м/ч}, \quad (11)$$

где l_{ϕ} – толщина фильтровальной загрузки, которая в экспериментальной установке равнялась 1 м; $h_{\phi,u,j}$ – потери напора на фильтре, м, в j-й момент времени фильтроцикла при скорости фильтрования воды $V_{\phi,j}$.

Результаты экспериментальных исследований

В лабораторной модели (рис. 1) биореактор был загружен из капроновых текстурированных жгутовых волокон диаметром $d_n = 13$ мкм, изготовленных по ТУ 6.06-С116-87 и закрепленных сверху и внизу в колосниковых решетках 4 для фиксации жгутов в натянутом состоянии и предотвращения их скручивания [31].

Такие волокна имеют гидрофобные свойства и являются хорошим материалом для иммобилизации микроорганизмов [32]. Удельная поверхность жгутового волокна определялась по формуле:

$$S_0 = 4 / d_n, \text{ м}, \quad (12)$$

где d_n – диаметр жгутового волокна.

Суммарная контактная поверхность волокнистой загрузки БР определяется по формуле:

$$S_{\phi,3} = \pi d_n l_{\phi} N, \text{ м}^2, \quad (13)$$

где l_{ϕ} – 0,8 м – длина волокна БР, м; N – количество волокон в модели БР диаметром $d_n = 0,002$ м равнялась $N = 200$ шт.

Итак, для модели БР: $S_0 = 4/0,002 = 2000$ м и $S_{\phi,3} = 3,14 \cdot 0,002 \cdot 0,8 \cdot 200 = 1,0048$ м².

КОФ был загружен вспененным полистиролом марки ПСВ ОСТ 6.05-202, гранулометрический состав которого приведен в таблице 1. Диаметр КОФ $d_{\phi} = 144$ мм и толщина загрузки $l_{\phi} = 1$ м.

Таблица 1. Результаты ситового анализа пенополистирольной загрузки КОФ

№ п/п	Диаметр отверстий сита, мм	Вес пустого сита, г	Вес сита с полистиролом, г	Масса полистирола, г	Количество фракций в пробе, P_i , %	$\sum P_i$, %	Средний диаметр зерен, d_i , мм	Соотношение, P_i/d_i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,5	99,72	100,25	0,53	2,65	2,65	0,75	3,53
2	1	113,93	114,5	0,57	2,85	5,50	1,5	1,90
3	2	112,96	114,31	1,35	6,75	12,25	2,25	3,00
4	2,5	110,85	113,31	2,46	12,30	24,55	2,75	4,47
5	3	104,02	107,02	3,00	15,00	39,55	3,25	4,62
6	3,5	95,79	101,92	6,31	30,65	70,20	4,0	7,66
7	4,5	100,67	103,98	3,31	16,55	86,75	4,75	3,48
8	5	97,53	99,54	2,01	10,05	96,80	5,25	1,91
9	5,5	95,28	95,88	0,60	3,00	99,80	6,25	0,48
	Всего			19,96	99,80			31,05

При проведении ситового анализа вспененного полистирола использовался набор сит с отверстиями от 0,5 до 5,5 мм.

Поберезниченко О.Ю. Контактное обезжелезивание подземных вод в системах сельскохозяйственного водоснабжения

Масса пробы составляла 20 г, сумма масс составляла 19,96 г, погрешность 0,2 %.

Эквивалентный диаметр зерен фильтрующей загрузки определялся по формуле:

$$d_e = 100 / \sum P_u / d_u, \text{ мм}, \quad (14)$$

а коэффициент его неоднородности:

$$K_n = d_{80} / d_{10}. \quad (15)$$

В этих формулах:

P_u – количество фракций в пробе, %, со средним диаметром d_u , которое принималось по таблице 1; d_{80} и d_{10} – диаметры гранул, меньше которых в данной пробе находятся соответственно 10 и 80 % от общей массы, которые определяются из графика (рис. 2), построенного по данным таблицы 1.

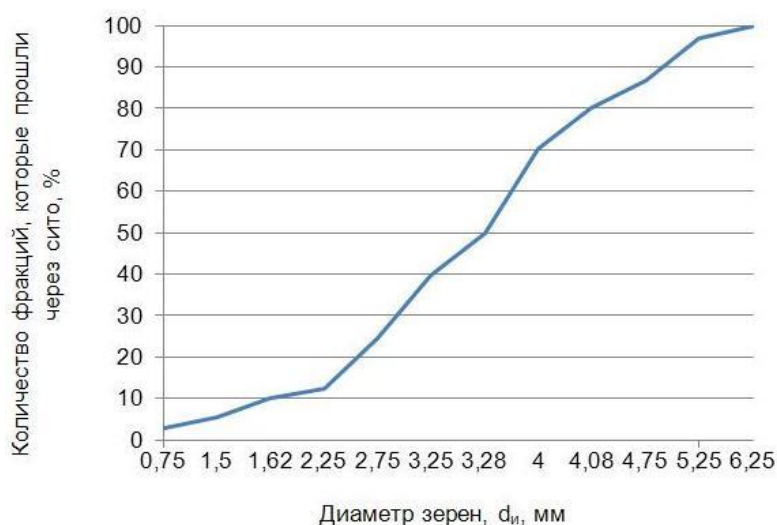


Рисунок 2. График гранулометрического состава пенополистирольной фильтровальной загрузки: $d_{10} = 1,62$ мм; $d_{50} = 3,18$ мм; $d_{80} = 4,08$ мм; $d_e = 3,22$ мм; $K_n = 2,52$

Удельную грязеемкость фильтра в любой (k -й) момент времени его работы в пределах фильтроцикла можно с достаточной для практических целей точностью определить по формуле:

$$G_{n.k.} = 0.0019V_{\phi} T_{\phi.k} C_b E_{cp}, \text{ кг/м}^2, \quad (16)$$

где C_b – среднее содержание железа в исходной воде за период фильтрования в течение фильтроцикла продолжительностью $T_{\phi.k}$, мг/дм³; E_{cp} – средняя эффективность обезжелезивания воды в течение этого периода, в долях единицы.

Минимальная удельная грязеемкость $G_{n.min}$ – такое минимальное количество осадка из $\text{Fe}(\text{OH})_3$, которое приходится на 1 м² площади фильтра, кг/м², при котором обеспечивается нормативное содержание железа в фильтрованной воде $C_{\phi} = 0,2$ мг/дм³ [33]. Максимальная удельная грязеемкость $G_{n.max}$ – такое максимальное количество этого осадка, кг/м², при котором фильтр нужно выключать на промывку в результате достижения предельных показателей качества воды или потерь напора на фильтре [34, 35, 36, 37].

Величины $G_{n.min}$ и $G_{n.max}$ зависят от конструктивных и технологических параметров фильтровальной загрузки:

$$G_{n.min} = f(d_e; \kappa_n; l_{\phi.u.}; V_{\phi}), \quad (17)$$

$$G_{n.max} = f(d_e; \kappa_n; l_{\phi.u.}; V_{\phi}). \quad (18)$$

Продолжительность полезной работы фильтра, то есть время после его зарядки, после которой удельная грязеемкость загрузки становится не меньше $G_{n.min}$ ($G_n \geq G_{n.min}$), и до достижения максимальной удельной грязеемкости ($G_n = G_{n.max}$), после которой фильтр нужно выключать на промывку, определяется по формуле:

Поберезниченко О.Ю. Контактное обезжелезивание подземных вод в системах сельскохозяйственного водоснабжения

$$T_{\phi.p} = \frac{G_{n.max} - G_{n.min}}{0,00191V_{\phi}C_{\phi}E_{cp}} = \frac{G_{n.p}}{0,00191V_{\phi}C_{\phi}E_{cp}} = \frac{1570,7}{V_{\phi}C_{\phi}E_{cp}}, \text{ ч}, \quad (19)$$

где $G_{n.p}$ – средняя расчетная (рабочая) удельная грязеемкость фильтровальной загрузки, кг/м^2 , которая зависит от конструктивных и технологических параметров фильтра и которую для исследуемого фильтра можно принимать в среднем $G_{n.p} = 3 \text{ кг/м}^2$.

Как видно из формулы (19), при увеличении содержания железа в исходной воде C_{ϕ} и скорости ее фильтрования V_{ϕ} величина $T_{\phi.p}$ будет уменьшаться.

При эксплуатации фильтра контроль величины $T_{\phi.p}$ следует уточнять по достижению фильтрованной водой предельного качества $C_{\phi.гр} = 0,2 \text{ мг/дм}^3$ или соответствующей ей величины потерь напора в фильтровальной загрузке $h_{\phi.max}$, определяемых по формуле:

$$h_{\phi.max} = V_{\phi}l_{\phi} / K_{\phi.min}, \text{ м}, \quad (20)$$

где $K_{\phi.min}$ – минимальный коэффициент фильтрации загрузки, м/ч , который имеет место при достижении максимально удельной грязеемкости $G_{n.max}$ для данной скорости фильтрования V_{ϕ} .

Исследования показали, что для одной и той же фильтровальной загрузки предельная величина $K_{\phi.min}$ будет уменьшаться при росте величины V_{ϕ} вследствие увеличения количества осадка $\text{Fe}(\text{OH})_3$, при котором растут потери напора на фильтре h_{ϕ} (табл. 2)

Таблица 2. Расчетные параметры исследуемой фильтровальной загрузки при обезжелезивании подземных вод

V_{ϕ} , м/ч	$G_{n.max}$, кг/м^2	$G_{n.min}$, кг/м^2	$G_{n.раб}$, кг/м^2	E_{cp}	$K_{\phi.min}$, м/ч	$h_{\phi.max}$, м
7	3,45	0,36	3,09	0,962	20	0,35
9	3,62	0,78	2,84	0,955	16,2	0,56
11	4,21	1,14	3,07	0,948	13,5	0,82

Процессы удаления железа из воды

При исследованиях процесса обезжелезивания подземных вод на экспериментальной установке (рис. 1) для определения ее оптимальных конструктивных и технологических параметров с целью уменьшения количества экспериментов меняли только скорость фильтрования воды V_{ϕ} и удельную грязеемкость загрузки G_n . Все остальные факторы были известными: $C_{\phi} = 2,8 \text{ мг/дм}^3$; $d_{\phi} = 3,22 \text{ мм}$; $K_n = 2,52$; $l_{\phi} = 1 \text{ м}$. Нормативная концентрация железа в очищаемой воде – $0,2 \text{ мг/л}$.

Поэтому исследования на установке сводили к установлению зависимостей:

$$C_{\phi.u.} = f(V_{\phi.u.}; G_{\phi.u.}), \quad (21)$$

$$h_{\phi.u.} = \varphi(V_{\phi.u.}; G_{\phi.u.}). \quad (22)$$

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 2. Отборы проб для химического анализа очищенной воды осуществляли через 8 ч. Эффективность обезжелезивания воды E_i определяли по формуле (7), накопления загрязнений за каждый интервал работы фильтра ΔG_i – по формуле (8), а удельную грязеемкость фильтра, то есть количество осадка $\text{Fe}(\text{OH})_3$, задержанного на фильтре от начала фильтроцикла до данного момента времени в расчете на 1 м^2 площади фильтра, – по формуле (9). Коэффициент фильтрации закольматованной загрузки для данного момента фильтроцикла определяли по формуле (10) после измерения величин потерь напора на фильтре в этот момент.

Конец фильтроцикла T_{ϕ} определялся при достижении проскоковой концентрации железа в фильтрованной воде ($C_{\phi.гр.} \geq 0,2 \text{ мг/дм}^3$).

Анализ экспериментальных исследований

По результатам экспериментальных исследований построены графики $E = f(T_{\phi}, V_{\phi})$ для трех значений скорости фильтрования воды на КОФ (рис. 3), из которых видно, что в течение фильтроцикла эффективность обезжелезивания воды E сначала возрастает до определенной величины, а затем начинает падать. Зная расчетную эффективность обезжелезивания воды, можем определить время зарядки фильтра и время эффективной работы фильтра для различных скоростей фильтрации.

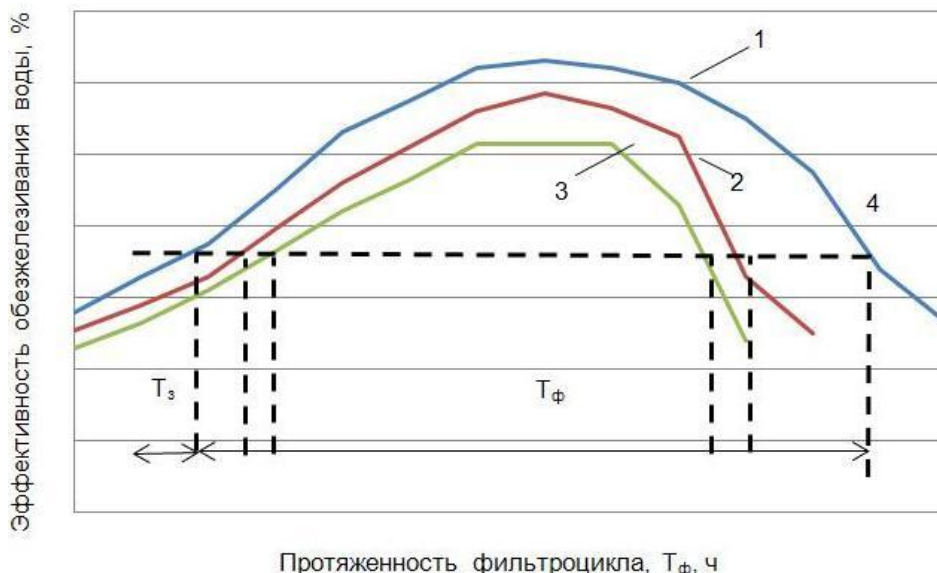


Рисунок 3. График зависимости эффективности обезжелезивания воды от продолжительности фильтроцикла для различных скоростей фильтрации: 1 – $E = f(T_{\phi})$ при $V_{\phi} = 7$ м/ч; 2 – $E = f(T_{\phi})$ при $V_{\phi} = 9$ м/ч; 3 – $E = f(T_{\phi})$ при $V_{\phi} = 11$ м/ч; 4 – расчетная эффективность обезжелезивания воды, 92,9 %; T_3 – время зарядки фильтра, ч; T_{ϕ} – время эффективной работы фильтра

По данным таблицы 3 построены графики $E = f(G_n, V_{\phi})$ для трех значений скорости фильтрования воды на КОФ (рис. 4), из которых видно, что в течение фильтроцикла эффективность обезжелезивания воды E сначала возрастает до определенной величины, а затем начинает падать. Зная расчетную эффективность обезжелезивания воды, можем определить минимальную удельную грязеемкость фильтра и эффективную рабочую грязеемкость фильтра для различных скоростей фильтрации.

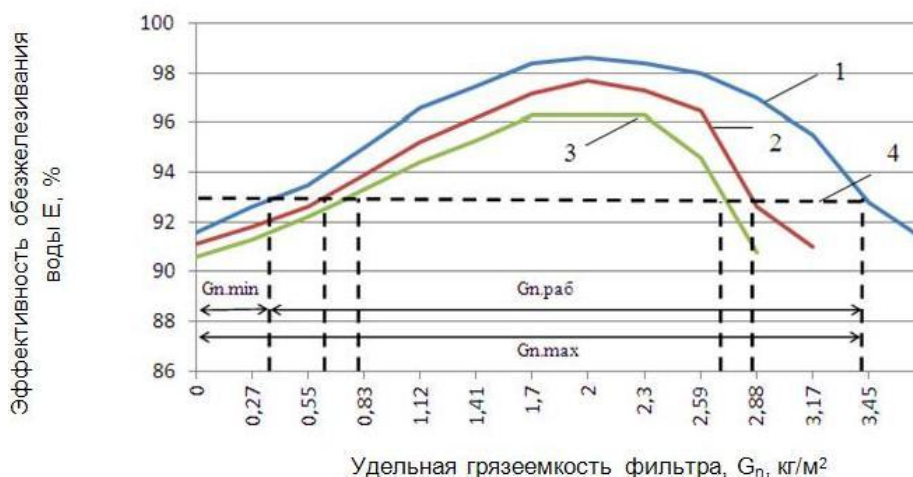


Рисунок 4. График зависимости эффективности обезжелезивания воды от удельной грязеемкости фильтра для различных скоростей фильтрации: 1 – $E = f(G_n)$ при $V_{\phi} = 7$ м/ч; 2 – $E = f(G_n)$ при $V_{\phi} = 9$ м/ч; 3 – $E = f(G_n)$ при $V_{\phi} = 11$ м/ч; 4 – расчетная эффективность обезжелезивания воды, 92,9 %; $G_{n.min}$ – минимальная грязеемкость фильтра, кг/м²; $G_{n.max}$ – максимальная грязеемкость фильтра, кг/м²; $G_{n.раб}$ – рабочая грязеемкость фильтра, кг/м²

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований

V_{ϕ} , м/ч	T_{ϕ} , ч			$G_{n.}$, кг/м ²		
	T_3	T_{max}	$T_{раб}$	$G_{n.min}$	$G_{n.max}$	$G_{n.раб}$
7	8	96	88	0,28	3,45	3,17
9	15	82	67	0,54	3,0	2,46
11	18	76	58	0,65	2,8	2,15

Итак, мы видим, что чем меньше скорость фильтрования воды на обезжелезивающей установке, тем дольше период эффективного фильтроцикла и меньше время зарядки фильтра. Чем меньше скорость фильтрования воды, тем больше эффективная удельная грязеемкость фильтра. Оптимальную скорость фильтрования воды для конкретного случая нужно определять с учетом технико-экономических расчетов, поскольку с уменьшением скорости фильтрования увеличивается диаметр фильтра и его стоимость.

Промывка фильтра. При промывке КОФ в фильтровальной загрузке необходимо оставлять осадок из гидроксида железа $Fe(OH)_3$ в объеме минимальной удельной грязеемкости $G_{n.min}$ для обеспечения нормативного качества очищенной воды в начале следующего фильтроцикла. Это достигается на основе опытно-производственных испытаний водообезжелезивающей установки при проведении пусконаладочных работ.

При эксплуатации КОФ важным решением является правильный выбор *интенсивности* $q_{пр}$ и *продолжительности промывки* плавающей пенополистирольной загрузки [18, 19], чтобы после каждой промывки не нужно было заряжать фильтр для обеспечения нормативного содержания железа в фильтрованной воде.

Для принятой величины $q_{пр}$ продолжительность промывки $t_{пр}$, мин, должна быть такой, чтобы остаточная удельная грязеемкость фильтра была равна минимальной удельной грязеемкости (табл. 2) для соответствующей скорости фильтрования воды V_{ϕ} (рис. 5).

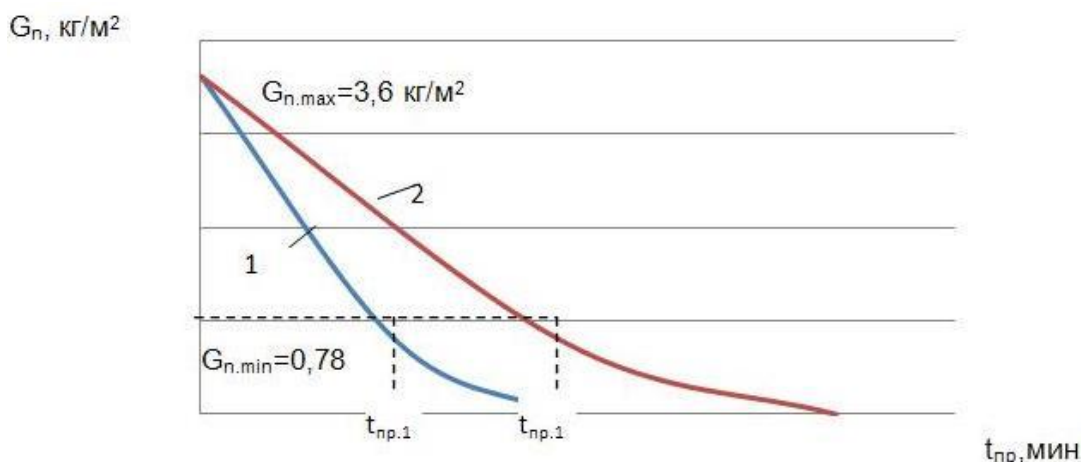


Рисунок 5. График изменения остаточной удельной грязеемкости фильтра при интенсивностях его промывки: 1 – $q_{пр} = 18 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$; 2 – $14 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$

Как видно на рисунке 5, для фильтра, у которого $G_{n.max} = 3,62 \text{ кг/м}^2$ и $G_{n.min} = 0,78 \text{ кг/м}^2$, при интенсивности промывки $q_{пр.1} = 18 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$ продолжительность промывки должна быть не более $t_{пр.1} = 1,3 \text{ мин}$ (78 с), а при $q_{пр.2} = 14 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$ – $t_{пр.2} = 2,4 \text{ мин}$ (144 с). Промывка фильтра осуществляется сверху вниз. Направления гидродинамических сил потока и сил гравитации совпадают, а осадок с $Fe(OH)_3$ быстро выносится из подфильтрового пространства.

Заключение

1. Для обеспечения нормативного содержания железа в питьевой воде предлагается использовать установку с биореактором и пенополистирольным фильтром и методику их расчета, полученную на основе обработки результатов проведенных экспериментальных исследований.

2. Оптимальные решения в многофакторных зависимостях были найдены с помощью метода Бокса – Уилсона, суть которого заключается в нахождении кратчайшего пути к оптимальному решению, при котором обеспечивается нужное качество очищенной воды при наименьших строительных и эксплуатационных расходах.

3. Исследования показали, что с увеличением скорости фильтрования воды V_{ϕ} увеличивается необходимая длительность зарядки фильтра T_3 и уменьшается продолжительность фильтроцикла $T_{\phi, max.}$, а следовательно, и продолжительность полезной работы фильтра $T_{\phi, роб.}$.

4. Эффективность обезжелезивания воды E и потери напора на фильтре h_{ϕ} прямо пропорционально зависят от удельной грязеемкости фильтра G_n и скорости фильтрования воды V_{ϕ} .

5. При промывке фильтра необходимо оставлять минимальную удельную грязеемкость фильтра, чтобы не заряжать фильтр в следующем фильтроцикле.

Литература

1. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. ДБН В.2.5-74:2013. К: 2013. 154 с.
2. ВБН 46/33-2.5-596 Сільськогосподарське водопостачання. Зовнішні мережі і споруди. Норми проектування. К: 1996. 152 с.
3. Седлухо Ю.П., Иванов С.А., Рудак А.П. Анализ рынка технологий и оборудования для обезжелезивания подземных вод // Вода и экология. 2006. №2. С. 55–62.
4. Яворський В.Т., Савчук В.Т., Рубай О.І. Перспективні напрямки очищення свердловинних вод від сполук феруму // Вісник національного університету «Львівська політехніка» [збірник наукових праць]. Львів, 2011. №700. С. 50–54.
5. Орлов В.О. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. Монографія / Рівне: НУВГП, 2008. 158 с.
6. Куницький С.О. Підготовка підземних вод при контактному знезалізненні на пінополістирольних фільтрах // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Випуск 1 (61). Рівне: УДУВГП, 2013. 157 с.
7. Мартинов С.Ю. Знезалізнення води на пінополістирольних фільтрах із зростаючим шаром завислого осаду: Дисс. ... канд. техн. наук. Рівне, Інститут водного господарства Рівненського державного технічного університету. 2001. 153 с.
8. Журба М.Г. Водоочистные фильтры с плавающей загрузкой. М., 2011. 536 с.
9. Журба М.Г., Говоров О.Б., Говорова Ж.М., Квартенко А.Н. Биореакторы-фильтры с плавающей загрузкой в технологиях кондиционирования подземных вод // Сантехника. 2012. № 3. С. 50–54.
10. Орлов В.О., Квартенко О.М., Мартинов С.Ю., Гордієнко Ю.І. Знезалізнення підземних вод для питних цілей. Рівне: УДУВГП, 2003. 155 с.
11. Журба М.Г., Савельев С.П., Урусов Д.Ю., Габля Ю.А., Дячук С.А., Лыков В.В., Парусов Д.В. Усовершенствование технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод города Ульяновска // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 2. С. 40–45.
12. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною»: ДСанПіН 2.2.4-171-10. [Чинний від 2010-05-12]. К.: МОЗ України, наказ №400. (Нормативный документ).
13. Гвоздяк П.И. Микробиология и технология очистки воды: Quo vadis? // Химия и технология воды. 1989. №9. С. 854–858.
14. Квартенко О.М. Використання закріпленої мікрофлори для очистки підземних вод з підвищеним вмістом заліза. Автореф. дис. канд. техн. наук. Рівне. 1997. 23 с.
15. Журба М.Г., Говоров О.Б., Говорова Ж.М., Квартенко А.Н. Исследование и опыт внедрения инновационных технологий кондиционирования подземных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. №9. С. 38–47.
16. Квартенко А.Н. Кондиционирование низкощелочных подземных вод, содержащих железогуминовые комплексы // Науковий вісник будівництва. Харків ХДТУБА. 2011. Вип. 63. С. 406–414.

17. Говоров О.Б. Безреагентное кондиционирование железосодержащих подземных вод на биореакторах-фильтрах: Дисс. ... канд. техн. наук. Вологда, 2007. 179 с.
18. Журба М.Г., Говорова Ж.М., Квартенко А.Н., Говоров О.Б. Биохимическое обез-железивание и деманганация подземных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9-2. С. 17–23.
19. Machmeier R.E. Iron in drinking water, FO-1318. Reviewed 1990. Minnesota Extension Service, University of Minnesota, Agriculture.
20. Francis C.A., Obratsova A.Y., Tebo B.M. Dissimilatory Metall Reduction by the Facultative Anaerobe *Pantoea agglomerans* SP1 // Applied and Environmental Microbiology. 2000. Vol. 66. No. 2. Pp. 543–548.
21. Порядин А.Ф. Экологические факторы питьевого водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 1998. №4. С. 4–6.
22. Robins N.S. Development of groundwater resources in Scotland // Proceedings of Institute of Civil Engineering. 1987. 59 p.
23. Mouchet P. Développement de la deferrisation biologique en France // Techn. sei. meth. 1989. № 7–8. Pp. 401–412.
24. Bertram Heinz-Ulrich. Die Überarbeitung der LAGA-Mitteiluig 20 // Baust. Recycl.+ Deponietechn. 2001. Vol. 17. No. 12. Pp. 20–28.
25. Grobler D.C., Van der Merwe W. Water quality management in the RSA: Preparing for the future // Water South Africa. 1990. Vol. 16. No. 1. Pp. 49–53.
26. Николадзе Г.И. Улучшение качества подземных вод: Автореф. дис. . д-ра техн. наук. М., 1996. 54 с.
27. Eastaugh P. Pollutant treatment process cuts water storage requirement // Offshore. 2002. Vol. 62. No. 3. Pp. 92–93.
28. Groundwater Microbiology: problems and Biological Treatment // Proceedings of IAWPRC Symposium Kuopio. Water Science and Technology. 1988. Vol. 20. No. 3. 351 p.
29. Дзюбо В.В. Подготовка подземных вод для питьевого водоснабжения малых населенных пунктов Западно-Сибирского региона. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: 2007. 36 с.
30. Журба М.Г. Классификаторы технологий очистки природных вод. М.: Союзводоканалпроект, 2000. 118 с.
31. Квартенко А.Н. Использование закрепленной микрофлоры для очистки подземных вод // Строительство Украины. 1998. № 3. С. 44–46.
32. Гуринович А.Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников. Минск: УП Технопринт, 2001. 304 с.
33. Говорова Ж.М. Обоснование и разработка технологий очистки природных вод, содержащих антропогенные примеси. Автореф. дис. док. тех. наук. М.: НИИ ВОДГЕО, 2004. 56 с.
34. Высоцкий С.П. Удаление из воды соединений железа, марганца и сульфидов // Материалы III МВФ «Аква Украина-2005 г.». Киев, 2005. С. 106–110.
35. Говоров О.Б. Усовершенствованные технологии кондиционирования подземных вод для питьевых целей // Сб. материалов конференции VII МФ «Живая вода России-2006», НПК «Вода и напитки», Москва, 2006. С. 43.
36. Киселев С.К. Моделирование и расчеты обезжелезивания воды на очистных фильтрах с учетом изменения гидравлических свойств загрузки. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев: КНУСА, 2000. 22 с.
37. Farm Water Supply Branch Alberta Agriculture and Rural Development. Alternatives for Iron Removal. Agdex 716 (D11). Revised March 2012.

Ольга Юрьевна Поберезниченко, г. Киев, Украина

+38(097)9264877; эл. почта: olia-olenia@ukr.net

© Поберезниченко О.Ю., 2015

doi: 10.5862/MCE.55.5

Contact elimination of iron from groundwater in agricultural water supply

O.Y. Pobereznichenko*Institute of Water Problems and Land Reclamation, Kiev, Ukraine
+38(097)9264877; e-mail: olia-olena@ukr.net*

Key words

groundwater, elimination of iron, bioreactor, polystyrene loading

Abstract

The authors constructed an experimental setup for contact elimination of iron from groundwater with a bioreactor and a polystyrene foam filter at an agricultural enterprise to ensure a regulatory content of iron in potable water. A method to calculate structural and technological parameters for filters to ensure minimum capital and operating costs under the regulatory quality indicators for purified water was developed.

Based on experimental research, the relationship between the speed of water filtering and the duration of filtering, as well as between the speed of water filtering and filter charging (and hence, the duration of the useful work of the filter) were defined.

The efficiency of deferrization and pressure loss across the filter in relation to the specific contaminant capacity of the filter and the filtration rate were studied. The minimum specific contaminant capacity of the filter for the experimental setup was determined.

References

1. *Vodopostachannya. Zovnishni merezhi ta sporudi. Osnovni polozhennya proyektivannya*. DBN V.2.5-74:2013. Kiev: 2013. 154 p. (ukr)
2. *VBN 46/33-2.5-596 Silskogospodarske vodopostachannya. Zovnishni merezhi i sporudi. Normi proyektivannya*. Kiev: 1996. 152 p. (ukr)
3. Sedlukho Yu.P., Ivanov S.A., Rudak A.P. Analiz rynku tekhnologiy i oborudovaniya dlya obezshelezivaniya podzemnykh vod [Analysis of the market for technology and equipment for elimination of iron from groundwater]. *Water and Ecology: problems and solutions*. 2006. No.2. Pp. 55–62. (rus)
4. Yavorskiy V.T., Savchuk V.T., Rubay O.I. *Perspektivni napryamki ochishchennya sverdlivnnykh vod vid spoluk ferumu. Visnik natsionalnogo universitetu «Lvivska politekhnika»* [zbirnik naukovikh prats]. Lviv, 2011. No. 700. Pp. 50–54. (ukr)
5. Orlov V.O. *Znezalznennya pidzemnykh vod sproshchenoyu ayeratsieyu ta filtruvannyam*. Rivne: NUVGP, 2008. 158 p. (ukr)
6. Kunitskiy S.O. *Pidgotovka pidzemnykh vod pri kontaktnomu znezalznenni na pinopolistirolnikh filtrakh. Visnik Natsionalnogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodozoristuvannya*. 2013. No. 1 (61). Pp. 85–91. (ukr)
7. Martinov S.Yu. *Znezalznennya vodi na pinopolistirolnikh filtrakh iz zrostayuchim sharom zavislogo osadu: Diss. ... kand. tekhn. nauk*. Rivne, Institut vodnogo gospodarstva Rivnenskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. 2001. 153 p. (ukr)
8. Zhurba M.G. *Vodochistnyye filtry s plavayushchey zagruzkoj* [Water filters with floating load]. Moscow, 2011. 536 p. (rus)
9. Zhurba M.G., Govorov O.B., Govorova Zh.M., Kvarthenko A.N. *Bioreaktory-filtry s plavayushchey zagruzkoj v tekhnologiyakh konditsionirovaniya podzemnykh vod* [Bioreactors filters with floating load in groundwater conditioning technology]. *SANTECHNIKA*. 2012. No. 3. Pp. 50–54. (rus)
10. Orlov V.O., Kvarthenko O.M., Martinov S.Yu., Gordienko Yu.I. *Znezalznennya pidzemnykh vod dlya pitnykh tsiley*. Rivne: UDUVGP, 2003. 155 p. (ukr)
11. Zhurba M.G., Savelyev S.P., Urusov D.Yu., Gabliya Yu.A., Dyachuk S.A., Lykov V.V., Parusov D.V. *Usovershenstvovaniye tekhnologii obezshelezivaniya i demanganatsii podzemnykh vod goroda Ulyanovska* [Improving the technology of deironing and demanganation of the underground waters in Ulyanovsk]. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2013. No. 2. Pp. 40–45. (rus)

12. Derzhavni sanitarni normi ta pravila «Gigienichni vimogi do vodi pitnoi, priznachenoi dlya spozhivannya lyudinoy»: DSanPiN 2.2.4-171-10. [Chinniy vid 2010-05-12]. Kiev: MOZ Ukraïni, nakaz №400. (Normativnyy dokument). (ukr)
13. Gvozdyak P.I. Mikrobiologiya i tekhnologiya ochistki vody: Quo vadis? [Microbiology and technology of water purification: Quo vadis?]. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 1989. No.9. Pp. 854–858.
14. Kvartenko O.M. *Vikoristannya zakriplenoï mikroflori dlya ochistki pidzemnykh vod z pidvishchenim vmistom zaliza. Avtoref.dis.....kand.tekhn.nauk*. Rivne. 1997. 23 p. (ukr)
15. Govorov O.B., Govorova Zh.M., Kvartenko A.N. Issledovaniye i opyt vnedreniya innovatsionnykh tekhnologiy konditsionirovaniya podzemnykh vod [Studies and experience of introducing innovative technologies of ground water conditioning]. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2014. No. 9. Pp. 38–47. (rus)
16. Kvartenko A.N. Konditsionirovaniye nizkoshchelochnykh podzemnykh vod, sodержashchikh zhelezoguminovyie kompleksy. *Naukoviy visnik budivnitstva. Kharkiv KhDTUBA*. 2011. Vip. 63. Pp. 406–414. (ukr)
17. Govorov O.B. *Bezreagentnoye konditsionirovaniye zhelezosoderzhashchikh podzemnykh vod na bioreaktorakh-filtrakh* [Reagentless conditioning iron underground waters on bioreactors filters]. PhD thesis. Vologda, 2007. 179 p. (rus)
18. Zhurba M.G., Govorova Zh.M., Kvartenko A.N., Govorov O.B. Biokhimeskoye obez-zhelezivaniye i demanganatsiya podzemnykh vod [Biochemical and iron removal demanganation of groundwater]. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2006. No. 9-2. Pp. 17–23. (rus)
19. Machmeier R.E. *Iron in drinking water, FO-1318*. Reviewed 1990. Minnesota Extension Service, University of Minnesota, Agriculture.
20. Francis C.A., Obraztsova A.Y., Tebo B.M. Dissimilatory Metall Reduction by the Facultative Anaerobe *Pantoea agglomerans* SP1. *Applied and Environmental Microbiology*. 2000. Vol. 66. No. 2. Pp. 543–548.
21. Poryadin A.F. Ekologicheskiye faktory pityevogo vodosnabzheniya [Environmental factors drinking water supply]. *Water Supply and Sanitary Technique*. 1998. No.4. Pp. 4–6. (rus)
22. Robins N.S. Development of groundwater resources in Scotland. *Proceedings of Institute of Civil Engineering*. 1987. 59 p.
23. Mouchet P. Développement de la deferrisation biologique en France. *Techn. sei. meth.* 1989. № 7–8. Pp. 401–412.
24. Bertram Heinz-Ulrich. Die Uberarbeitung der LAGA-Mitteiluig 20. *Baust. Recycl.+ Deponietechn.* 2001. Vol. 17. No. 12. Pp. 20–28.
25. Grobler D.C., Van der Merwe W. Water quality management in the RSA: Preparing for the future. *Water South Africa*. 1990. Vol. 16. No. 1. Pp. 49–53.
26. Nikoladze G.I. *Uluchsheniye kachestva podzemnykh vod* [Improving the quality of of groundwater]. PhD thesis abstract. Moscow, 1996. 54 p.
27. Eastaugh P. Pollutant treatment process cuts water storage requirement. *Offshore*. 2002. Vol. 62. No. 3. Pp. 92–93.
28. Groundwater Microbiology: problems and Biological Treatment. *Proceedings of IAWPRC Symposium Kuopio. Water Science and Technology*. 1988. Vol. 20. No. 3. 351 p.
29. Dzyubo V.V. *Podgotovka podzemnykh vod dlya pityevogo vodosnabzheniya malykh naseleennykh punktov Zapadno-Sibirskogo regiona* [Preparation of groundwater for drinking water supply of small settlements West Siberian region]. PhD thesis abstract. Sain-Petersburg, 2007. 36 p.
30. Zhurba M.G. *Klassifikatory tekhnologiy ochistki prirodnykh vod* [Classifications natural water purification technologies]. Moscow: Soyuzvodokanalproyekt, 2000. 118 p.
31. Kvartenko A.N. Ispolzovaniye zakreplenoï mikroflory dlya ochistki podzemnykh vod [Using the fixed microflora for cleaning of groundwater]. *Stroitelstvo Ukrainy*. 1998. No. 3. Pp. 44–46. (rus)
32. Gurinovich A.D. *Pityevoye vodosnabzheniye iz podzemnykh istochnikov* [Drinking water from underground sources]. Minsk: UP Tekhnoprint, 2001. 304 p.
33. Govorova Zh.M. *Obosnovaniye i razrabotka tekhnologiy ochistki prirodnykh vod, sodержashchikh antropogennyye primesi* [Justification and development of technologies for purification of natural water containing anthropogenic contaminants]. Abstract of a doctoral dissertation. Moscow: NII VODGEO, 2004. 56 p. (rus)
34. Vysotskiy S.P. Udaleniye iz vody soyedineniy zheleza, margantsa i sulfidov [Removal of water from compounds of iron, manganese and sulfides]. *Materialy III MVF «Akva Ukraina-2005 g.»*. Kiev, 2005. Pp. 106–110. (rus)

35. Govorov O.B. Usovershenstvovannyye tekhnologii konditsionirovaniya podzemnykh vod dlya pityevykh tseley [Improved conditioning technology of underground waters for drinking purposes]. *Sb. materialov konferentsii VII MF «Zhivaya voda Rossii-2006», NPK «Voda i napitki»* [Collection of conference materials VII MF "Living Water of Russia-2006", NPK "Water and drinks"]. Moscow, 2006. P. 43. (rus)
36. Kiselev S.K. *Modelirovaniye i raschety obezhelezivaniya vody na ochistnykh filtrakh s uchetom izmeneniya gidravlicheskikh svoystv zagruzki* [Modeling and calculations for elimination of iron from water in filters taking into account change the hydraulic properties of the load]. PhD thesis abstract. Kiev: KNUSA, 2000. 22 p. (rus)
37. *Farm Water Supply Branch Alberta Agriculture and Rural Development. Alternatives for Iron Removal. Agdex 716 (D11). Revised March 2012.*

Full text of this article in Russian: pp. 38–48