

УДК 628.112

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70

ЗАКАЧКА ВОДЫ В ПОДЗЕМНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ ПЛАСТ СКВАЖИНЫ ИЗ ПЫЛЕВИДНОГО И СРЕДНЕ-МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ПЕСКА ПРИ МАЛОМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИИ

Е.И. РАШКЕВИЧ¹

*(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»)*

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО²

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

selenariko@gmail.com¹, yuvd46@mail.ru²

В статье описываются основные операции по закачке воды в подземный водоносный пласт скважины. Авторами проведена оценка закачки воды в подземный пласт из пылевидного и мелкозернистого песка при малом водопотреблении населенного пункта в Витебской области.

Ключевые слова: характеристика скважины и водоносного слоя, качество воды, особенности закачки воды в подземный пласт.

Введение. Подземные воды на территории Беларуси приурочены к породам кристаллического фундамента и к осадочным образованиям верхнего протерозоя-кайнозоя. Единицами региональных гидрогеологических подразделений являются горизонты и комплексы [1; 2; 4].

Водоносным горизонтом, или аквифером, называют один или несколько контактирующих между собой слоев горных пород (преимущественно, осадочных), имеющих сходный состав и происхождение, с высокими показателями водопроницаемости. Для систем водоснабжения водоносным горизонтом считают зону под поверхностью земли, которая способна обеспечить добычу воды в масштабах, имеющих практическое (экономическое, стратегическое, промышленное и т.д.) значение.

В соответствии с геологическим строением, стратиграфическим расчленением, литологическим составом пород, их фильтрационными свойствами и характером водоносности выделены: водоносные, слабоводоносные локально водоносные, слабоводоносные, водоупорные локально водоносные горизонты и комплексы.

Аллювиальные горизонты относятся к гидрогеологическим подразделениям четвертичного возраста и почти сплошным чехлом покрывают всю территорию Беларуси, причем водовмещающими породами служат водно-ледниковые отложения верхнечетвертичного поозерского образования. Породы представлены преимущественно песками различной зернистости с большим или меньшим содержанием гравийно-галечного материала, пылевато-глинистых примесей, с прослоями и линзами супесей, суглинков и глин, а также уплотненными меловыми и доломитовыми образованиями [4].

В рыхлых породах вода накапливается в порах между частицами зернистого материала, а уплотненных – в полостях (кавернах) и трещинах или карстах.

В гидрогеологии водоносные слои делят по типу составляющих горных пород [5]. К ним относятся:

– аллювий, представляющий собой нецементированные (зернистые) осадочные породы, которые возникают в результате отложений в водных протоках (песок, галька, гравий, ил);

– ледниковые отложения – неуплотненные пласты горных пород, образовавшиеся и перемещавшиеся при движении ледников;

– уплотненные отложения – пласты осадочных пород, подвергающиеся давлению верхних слоев;

– метаморфические (трещиноватые) вулканические горные породы.

В последние годы динамика развития водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) Витебской области направлена на решение вопросов улучшения надлежащего качества воды со снижением затрат на оказание услуг.

С этой точки зрения целесообразно рассмотреть вопрос применения метода подготовки воды непосредственно в водоносном пласте скважин, который пока мало изучен в Республике Беларусь [3], что является *актуальной и значимой* задачей.

Технология внутрипластового удаления железа, марганца и некоторых органических соединений известна уже более 100 лет. В настоящий момент за рубежом, в том числе в России, в системах водоснабжения работают свыше 250 установок внутрипластовой очистки воды производительностью 0,5–90 тыс. м³/сут^{1,2} [7].

Эффективность данного метода оценивается исходя из минералого-литографического состава водоносных слоев, строения этих горизонтов, а также химического состава подземных вод и производительности системы водоснабжения. Для определенного состава исходных подземных вод этот метод (*in-situ*) может быть проще и дешевле

¹ Коммунар, Г.М. Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.04 / Г.М. Коммунар. – М., 1987. – 469 л.

² Методические рекомендации по опытно-технологическим исследованиям условий обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном горизонте / сост. В.В. Кулаков, Б.С. Архипов, С.А. Козлов ; науч.-техн. центр «Дальгеоцентр». – Хабаровск, 1999. – 60 с.

в реализации и эксплуатации, чем более распространенное удаление загрязнений непосредственно на станциях и установках водоподготовки наземного расположения (ex-situ)³ [6].

Сущность метода заключается в осуществлении процессов удаления загрязнений непосредственно в водоносном горизонте (слое) путем циклической закачки воды, предварительно обогащенной кислородом, для создания окислительной зоны вокруг эксплуатационной скважины. Следует отметить, что его применение ограничено гидрогеологическими особенностями подземных слоев, которые должны быть достаточно пористыми для надлежащего насыщения воды кислородом. При этом используется многоскважинная система, состоящая отдельно из поглощающих и эксплуатационных скважин, но которая также возможна и в условиях двух работающих скважин.

Стадия закачки воды непосредственно в подземный водоносный пласт является основной, от которой зависит весь последующий процесс удаления железа. Желательно, чтобы вода для ее закачки в пласт соответствовала требованиям СанПиН 10.124-99 РБ и содержание растворенного кислорода в ней составляло 10–12 мгО₂/дм³.

Обогащение воды, закачиваемой в подземный слой, кислородом воздуха рекомендуется выполнять с помощью эжектора⁴. При необходимости производят удаление растворенных газов из воды, подготовленной для введения в водоносный пласт, тогда может использоваться дегазатор, рассчитываемый на продолжительность пребывания в нем воды от 3 до 5 мин.

После закачки воды в пласт и закрепления кислорода в водоносном слое производится ее подача из скважины в водопроводную сеть.

Объект исследований. Для проведения исследований по закачке воды в подземный водоносный пласт был определен малый населенный пункт в Докшицком районе Витебской области. Система водоснабжения принята централизованная, состоящая из водозабора, регулирующей емкости (водонапорная башня) и разводящей тупиковой водопроводной сети. Суточное водопотребление малого населенного пункта составляет до 50 м³, максимальный часовой расход – 6 м³/ч.

Водозабор состоит из двух скважин: «старой» – № 1 (была пробурена в 1994 г.) и «новой» – № 2 (2021 г.), хотя и разной глубины (29,6 и 37,8 м соответственно), но с единым водоносным слоем. Расстояние между ними составляет 12 м. Скважины имеют несовершенный характер погружения и работают в переменном режиме.

Конструкция фильтров скважин: проволочная, высота 5 м. В скважине № 2 предусмотрена гравийная обсыпка фильтра фракцией 1...1,8 мм, интервал с 10...38 м. Дебет скважин при понижении уровня воды в них на 9,5 м составляет 10 м³/ч. В скважинах установлены насосы типа Wilo номинальным расходом 5 м³/ч с напором 80 м на глубину от поверхности земли 30 м. Вода в водонапорную башню и далее в сеть может подаваться из любой скважины с расходом до 8 м³/ч.

Показатели среднего состава подземной воды в скважинах представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристика подземной воды скважин № 1 и № 2*

Наименование показателей	Значение показателей	
	Скважина № 1	Скважина № 2
Запах (ПДК при 20 ⁰ С = 2 балла)	3	3
Привкус (ПДК при 20 ⁰ С = 2 балла)	3 (железистый)	3 (железистый)
Цветность (ПДК = 20 град.)	8,1	9,2
Мутность (ПДК = 1,5 мг/дм ³)	4,5	4,5
Величина рН (ПДК в пределах 6-9)	7,5-7,6	7,55-7,68
Величина Eh, мВ	74	65
Минерализация общая (ПДК = 1000 мг/дм ³)	480	460
Жесткость общая Ж _о (ПДК = 7 мг-экв/дм ³)	7,0	7,0
Окисляемость перманганатная (ПДК = 5,0 мгО ₂ /дм ³)	1,6	1,6
Хлориды Cl ⁻ (ПДК = 350 мг/дм ³)	67,42	62,11
Сульфаты SO ₄ ²⁻ (ПДК = 500 мг/дм ³)	51,58	50,80
Железо Fe общее (ПДК = 0,3 мг/дм ³)	1,5-2,9	2,5-3,1
Марганец Mn ²⁺ (ПДК = 0,1 мг/дм ³)	0,11	0,11
Натрий Na ⁺ (ПДК = 200 мг/дм ³)	15,25	15,00
Калий K ⁺ (ПДК = 20 мг/дм ³)	1,26	0,96
Аммиак NH ₄ ⁺ (ПДК = 2,0 мг/дм ³)	0,2-0,3	0,2-0,3
Нитриты NO ₂ ⁻ (ПДК = 2,0 мг/дм ³)	≤0,2	≤0,2
Нитраты NO ₃ ⁻ (ПДК = 45 мг/дм ³)	≤0,2	≤0,2
Сероводород H ₂ S (ПДК = 0,05 мг/дм ³)	отсутствует	отсутствует

Примечание. *Анализы представлены химической лабораторией «Докшищыводоканал». Аттестат соответствия аккредитации № ВУ/112.2.5150. Также использовались тестовые приборы: на общее железо фотометр Milwaukee MW14, на аммоний – Ammonium Test colorimetric, 0,2-8,0 mg/l (NH₄⁺), кислородомер Hanna HI 9142, pH-метр типа pH-061 и Eh-метр типа ORP-969.

³ Rott, U. Residue-free Removal of Arsenic, Iron, Manganese, Ammonia, Nitrate and Colour from Groundwater / U. Rott, C. Meyer // Innovations in Conventional and Advanced Water Treatment Processes : Conference Proceedings, Amsterdam, 26–29 Sept. 2000. – P. 8–14.

⁴ Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы Республики Беларусь : СН 4.01.01-2019. – Введ. 31.10.19. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 73 с.

Основной скважиной, для которой осуществляется закачка воды в водоносный пласт, определена скважина № 2. Гидрогеологический разрез этой скважины представлен на рисунке 1.

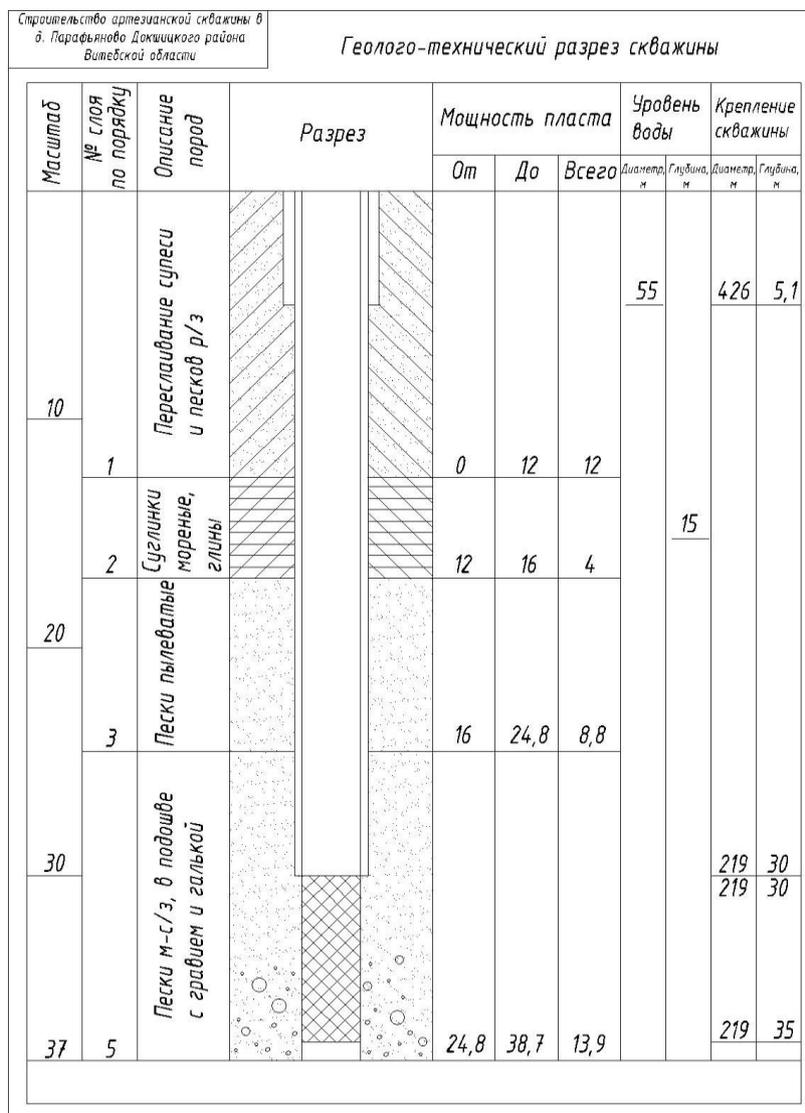


Рисунок 1. – Гидрогеологический разрез скважины № 2

Анализ гидрогеологического разреза скважины № 2 свидетельствует о наличии верхнего водоупорного слоя из глины (12–16 м ниже уровня земли) и нижнего водоносного горизонта, состоящего из двух слоев. Песок пылевидный коричневый, влажный, плотный (толщина слоя от 16,0 до 24,8 м) – 8,8 м. Песок мелко-среднезернистый (от 24,8 до 38,7 м) – 13,9 м. Водоносные слои сообщаются друг с другом. Общая высота составляет 22,7 м.

Характеристика водоносных слоев представлена ниже.

Песок пылевидный, размер зерен менее 0,1 мм, пористость порядка 25–30%, плотность 17,8–10,3 кН/м³, по составу полиминеральный кварцево-полевошпатовый (кварц – 50–90%, полевые шпаты – 50–10%). Коэффициент фильтрации менее 0,5–1 м/сут, проницаемости – 0,5...1,16 Дарси (физическая величина, которая характеризует способность вещества пропускать жидкости и газы).

Песок мелкозернистый светло-серый, влажный, рыхлый, водоносный. Размер зерен составляет 0,25–0,1 мм, пористость порядка 30–35% (выражаясь языком обывателя, «чуть крупнее, чем могильный песок»). По составу кварцево-полевошпатовый. Коэффициент фильтрации песка варьируется в пределах от 1–5 м/сут, а проницаемости находится в пределах 1,16...11,6 Дарси.

Песок среднезернистый. Размер зерен составляет 0,5–0,25 мм (выражаясь языком обывателя, «обычный песок (речной)»), плотность 17,8–10,3 кН/м³. Состав песка, скорее всего, кварцево-полевошпатовый, коэффициент фильтрации песка варьируется в пределах от 5–20 м/сут. Коэффициент проницаемости находится в пределах 11,6–29 Дарси, пористость – 30–35%.

При проведении наблюдений на скважине (производительность, разность уровней) можно будет более точно определить данные показатели.

Экспериментальная часть. Закачка воды в пласт «новой» скважины № 2 производится из существующей «старой» № 1. Насыщение воды воздухом производилось с помощью эжектора на производительность до 5 м³/ч. Технологическая схема представлена на рисунке 2.

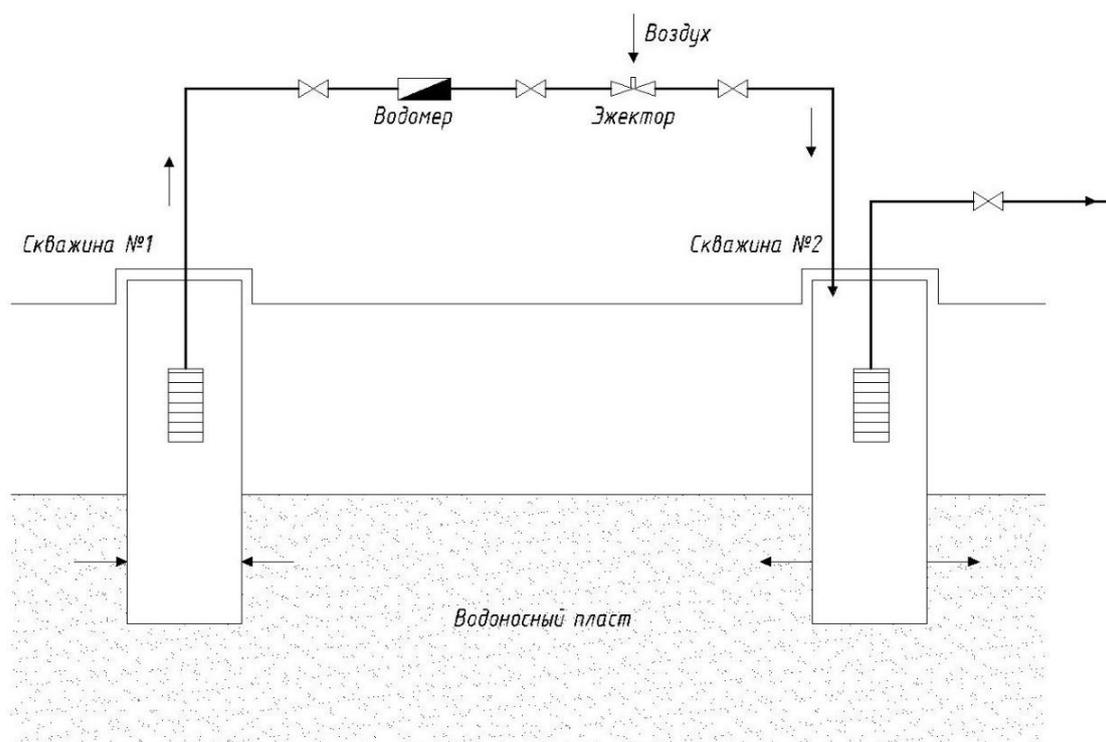


Рисунок 2. – Технологическая схема закачки воды от скважины № 1 («старой») в водоносный пласт скважины № 2 («новой»)

Основными величинами эксплуатации скважины являются объемы воды на закачку воды W_3 и дальнейшую ее откачку W_{om} в систему водоснабжения⁵ [3; 6]. При этом:

$$W_3 = Q_3 \cdot t_3, \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$W_{om} = Q_{om} \cdot t_{om}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где Q_3 и Q_{om} – расходы воды, пошедшие на ее закачку в водовмещающий пласт и откачку в систему водоснабжения рассматриваемого объекта, м³/ч;

t_3 и t_{om} – продолжительность подачи воды, пошедшей на ее закачку в водовмещающий пласт и откачку в систему водоснабжения рассматриваемого объекта, ч.

Исходя из конструктивных особенностей скважины и ее параметров, по определению этих величин, можно выполнить предварительные расчеты⁶ [6], но с обязательным последующим их уточнением при проведении инженерных изысканий в период ее эксплуатации.

При этом надо учитывать наличие избыточного давления на устье скважины, необходимого для задавливания воды в пласт, которое зависит, прежде всего, от характеристики водоносного слоя. С достижением максимальной величины избыточного давления можно определить возможный объем закачки, который должен быть $W_3 \leq W_{om}$, иначе применение рассматриваемого метода становится нецелесообразным. Обычно это соотношение составляет 1:(5...80), но может быть и больше.

Пробная закачка показала, что в начальном режиме этой стадии происходит свободный излив воды в скважину № 2 с показанием манометра перед эжектором, равным 0,12 МПа. Было принято решение проводить стадию закачки воды в пласт скважины № 2 до достижения избыточного давления в 0,4 МПа перед эжектором, исходя из параметров работы насоса, установленного в скважине № 1.

Следует отметить, что качество закачиваемой воды в пласт от скважины № 1 не соответствовало СанПиН 10.124-99 РБ (таблица 1), особенно по концентрациям железа и марганца. Концентрация кислорода в воде после эжектора составила порядка 8–10 мгО₂/м³.

⁵ См. сноску 1.

⁶ См. сноску 1.

Первоначально был установлен байпасный режим работы насоса скважины № 2 «на себя» (порядка 5 ч) для получения максимальной концентрации кислорода в воде ее колонн. Далее был включен режим закачки воды от скважины № 1. Учитывая необходимость подачи воды в водопроводную сеть малого населенного пункта, расход воды на закачку воды в пласт, в среднем, составил 2,5 м³/ч.

Установлено, что первые трое суток вода подавалась в скважину после эжектора в свободном режиме ее поступления в оголовок. В последние двое суток установилось избыточное давление на оголовке скважины. Для его снижения периодически открывался вентиль, через который отводились образовавшиеся газы, появился запах слабый болотистый.

На рисунке 3 представлена зависимость роста величины избыточного давления перед эжектором от продолжительности закачки воды в скважину № 2 от скважины № 1. По окончании 5 суток закачка воды в пласт была остановлена. По данным водосчетчика в скважину было закачено порядка 300 м³.



Рисунок 3. – Зависимость роста величины избыточного давления перед эжектором от продолжительности закачки воды в скважину № 2 от скважины № 1

По окончании стадии закачки воды в скважину проводился ее отстой для закрепления водно-растворенного кислорода в водоносном пласте. Продолжительность отстоя обычно принимается не менее 2–4 суток. В данном случае она составила 3 суток (72 ч.). После этого была произведена прокачка воды из скважины № 2 на рельеф местности. Объем прокачки был определен путем контроля за показаниями водосчетчика, концентрации общего железа, величин рН и Eh.

В таблице 2 и на рисунках 4–5 приведены данные по эксперименту прокачки воды из скважины № 2 на рельеф местности. Одновременно производился отвод газов, прежде всего, углекислого, но при этом отмечался более характерный болотный запах воды, что свидетельствует об образовании какой-то части аммиака и сероводорода.

Таблица 2. – Результаты эксперимента по прокачке воды из скважины № 2

Количество откаченной воды из скважины № 2, м ³	Показатели качества воды				Примечание
	Запах, Привкус, баллы	Железо общее, мг/дм ³	рН	Eh, мВ	
0	3 (железистый)	3,08	7,7	65	Приведены показатели воды до закачки в пласт
0,5	5 (болотистый резкий)	4,63	7,63	105	Давление насоса – 0,15 атм. Расход насоса примерно 2,5–3 м ³ /ч
5,0	То же	4,25	7,6	104	Болотный запах не снижается
7,0	4 (болотистый)	3,26	7,7	115	Болотный запах начал быстро снижаться, проявляется железистый
10,5	3 (железистый)	0,7	7,6	125	Еле уловимый запах, болотный практически исчез, проявляется слабый, скорее всего, железистый
15,0	2	0,4	7,6	145	Запах отсутствует
38,0	2	0,35	7,65	145	Запах отсутствует

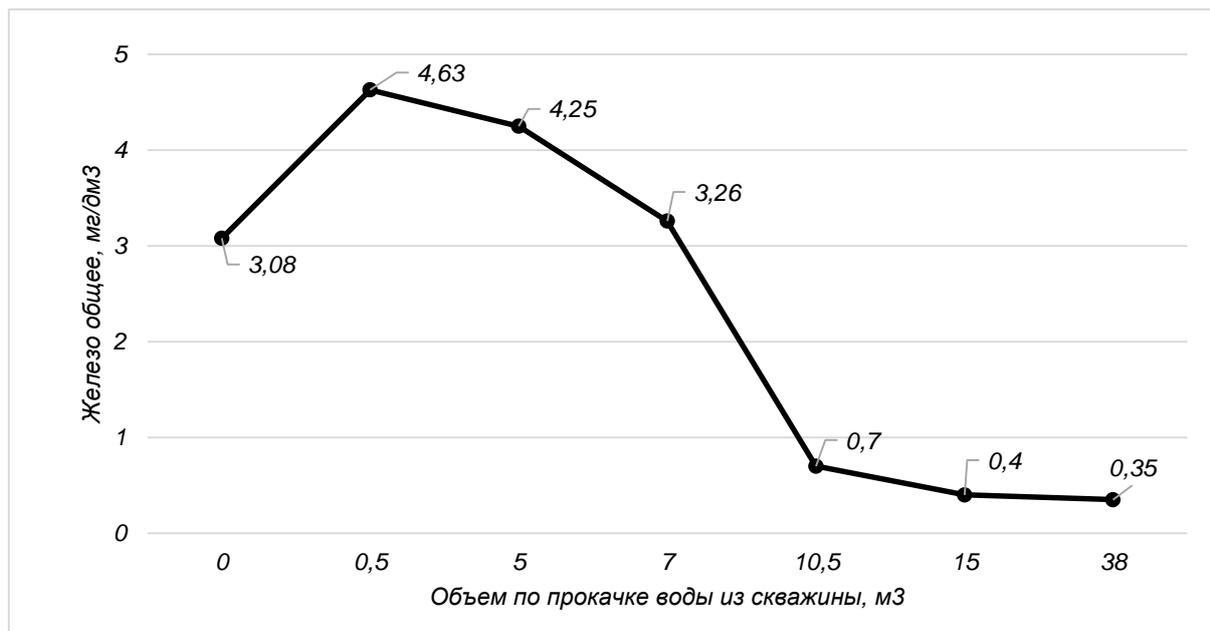


Рисунок 4. – Изменение концентрации железа от объема прокачки воды из скважины № 2 на выброс после ее закачки в пласт

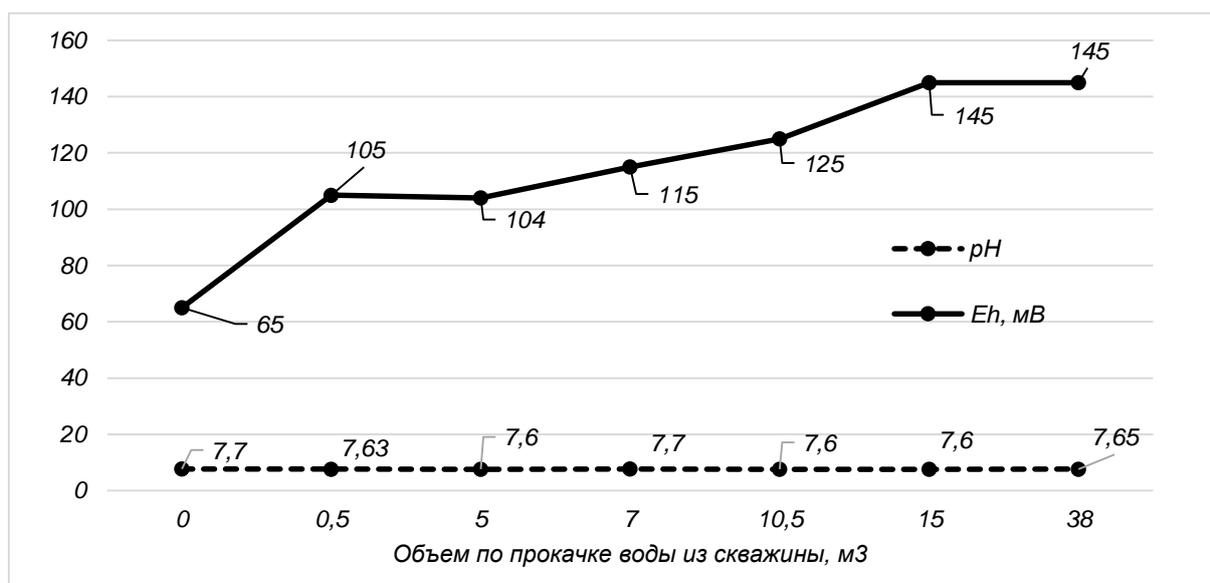


Рисунок 5. – Зависимость величин Eh и pH от объема прокачки воды скважины № 2 на выброс после ее закачки в пласт

Заключение. Итак, проведение стадии закачки воды в пласт из пылевидного и средне-мелкозернистого песка позволило установить следующее.

Основным водоносным слоем в данном случае следует считать средне-мелкозернистые пески. Этот слой имеет большую площадь межпорового пространства, поэтому можно предположить, что на его зернах будет закрепляться более высокая концентрация кислорода, чем в других породах. В пылевидный плотный слой и ввиду его верхнего расположения, скорее всего, будет поступать только незначительная часть кислорода от закаченной воды в пласт.

Первоначальную закачку воды в пласт и подготовку скважины к откачке необходимо проводить под постоянным контролем, желательно все операции выполнять в ручном режиме, особенно уделив внимание росту величины давления на оголовке скважины. При этой величине свыше 0,4 МПа дальнейшую закачку воды в водоносный пласт производить не следует ввиду возможного нарушения стыков колонн скважины и повреждения ее фильтра.

Для более полного проникновения в стадии закачки кислорода в подземный пласт можно периодически предусматривать дополнительные мероприятия, которые используются при проведении восстановительных ремонтных работ скважин.

Установление в воде после закачки величины Eh более 100 мВ свидетельствует об окислении двухвалентного железа в трехвалентную форму и его задержании в подземном пласте.

Следует отметить, что величина pH в процессе закачки воды в скважину и дальнейшей ее прокачки практически не изменяется и составляет 7,6–7,7. Также не происходит изменение концентрации аммонийных соединений – 0,2–0,3 мг/дм³.

После окончания прокачки воды из скважины № 2 была отобрана проба в специализированную лабораторию на органолептические показатели (≤ 2 баллов), железо (0,3 мг/дм³), окисляемость (1,8 мгО₂/дм³) и параметры бактериального анализа, которые показали их соответствие СанПиН 10.124-99 РБ. Скважину можно переключать на водопроводную сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Всеволожский, В.А. Основы гидрогеологии / В.А. Всеволожский. – М. : МГУ, 2007. – 448 с.
2. Гледко, Ю.А. Гидрогеология / Ю.А. Гледко. – Минск : Выш. шк., 2012. – 446 с.
3. Гуринович, А.Д. Возможности удаления из воды железа в водоносном пласте на примере существующих водозаборных скважин / А.Д. Гуринович, П. Ваврженюк, И. Ельский // Вода и экология: проблемы и решения. – 2013. – Т. 2, № 54. – С. 12–20.
4. Кудельский, А.В. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси / А.В. Кудельский, В.И. Пашкевич. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 261 с.
5. Ленченко, Н.Н. Динамика подземных вод (теоретический курс) / Н.Н. Ленченко. – М. : МГГУ, 2004. – 209 с.
6. Плотников, Н.А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н.А. Плотников, В.С. Алексеев. – М. : Стройиздат, 1990. – 256 с.
7. Rott, U. 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland / U. Rott, M. Friedle // Wasser, Abwasser. – 2000. – Bd. 141, № 13. – S. 99–107.

REFERENCES

1. Vsevolozhskii, V.A. (2007). *Osnovy gidrogeologii*. Moscow: MGU. (In Russ.).
2. Gledko, Y.A. (2012). *Gidrogeologiya*. Minsk: Vysheishaya shkola. (In Russ.).
3. Gurinovich, A.D., Vavrzhenyuk, P. & El'skii, I. (2013). *Vozmozhnosti udaleniya iz vody zheleza v vodonosnom plaste na primere sushchestvuyushchikh vodozabornykh skvazhin* [Possibilities of removing iron from water in an aquifer using the example of existing water wells]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], 2 (54), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kudel'skii, A.V. & Pashkevich, V.I. (2014). *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi*. Minsk: Belarus. navuka. (In Russ.).
5. Lenchenko, N.N. (2004). *Dinamika podzemnykh vod (teoreticheskii kurs)*. Moscow: MGGU. (In Russ.).
6. Plotnikov, N.A. & Alekseev, V.S. (1990). *Proektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
7. Rott, U. & Friedle, M. (2000). 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland. *Wasser, Abwasser*, 141 (13), 99–107. (In German).

Поступила 22.08.2022

WATER INJECTION INTO THE UNDEGROUND AQUIFER OF THE WELL FROM PULVERIZED AND MEDIUM-FINE-GRAINED SAND AT LOW WATER CONSUMPTION

H. RASHKEVICH

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

V. YUSCHENKO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article describes the main operations for water injecting into the underground aquifer of the well. The authors assessed and evaluated the process of water injection into the aquifer from pulverized and fine-grained sand with low water consumption of the settlement in the Vitebsk region.

Keywords: characteristics of the well and the aquifer, water quality, features of water injection into the underground formation.