

УДК 628.11(628.16)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-46-49

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
В СКВАЖИНАХ ДЛЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ****Е.И. РАШКЕВИЧ***(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие  
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»  
selenaruko@gmail.com*

В статье дана характеристика песчаных водоносных слоев, описано образование санитарных зон скважин, создание окислительной зоны скважин, произведены замеры уровней воды и их годовое изменение, выполнен расчет кольматации водоносного слоя.

**Ключевые слова:** подземные водоносные слои и горизонты, зоны санитарной охраны, окислительная зона, уровни воды в скважинах, расчет кольматации водоносного слоя.

**Введение.** В Республике Беларусь подземные воды используются как основной источник централизованного водоснабжения населения и являются надежными в гигиеническом и эпидемиологическом отношении по сравнению с поверхностными водоемами.

Применительно к системам водоснабжения малых населенных мест или отдельных предприятий, для забора подземных вод используются скважины в количестве 1–2 шт. и, как правило, глубиной 35–100 м.

Для слагающих водоносных слоев в таких скважинах характерны гидрогеологические четвертичные отложения, которые сплошным чехлом перекрывают всю территорию республики [1] и находятся в верхней части зоны активного водообмена, что предопределяет формирование здесь пресных и ультрапресных подземных вод преимущественно гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава. Причем водовмещающими породами служат, прежде всего, водно-ледниковые отложения верхнечетвертичного поозерского образования, которые могут быть по вертикали в один или несколько водоносных слоев (горизонтов, пластов), локально водоносного или слабоводоносного характера.

Для систем водоснабжения водоносным слоем (горизонтом) считают зону под поверхностью земли, которая способна обеспечить добычу воды в масштабах, имеющих практическое (экономическое, стратегическое, промышленное и т.д.) значение.

Объект исследований – внутрипластовая обработка подземных вод в двух скважинах с водоносными песчаными слоями для малого населенного пункта, расположенного в Докшицком районе Витебской области. Производительность по воде системы водоснабжения выбранного объекта составляет до 50 м<sup>3</sup>/сут, часовые расходы: средний – 2, максимальный – 5 м<sup>3</sup>/ч.

Для подачи воды в малый населенный пункт используются две скважины № 1 и № 2 с дебитом каждая до 10 м<sup>3</sup>/ч, глубиной до 39 м и длиной проволочных фильтров 5 м. Расстояние между скважинами равно 12 м.

Скважины имеют несовершенный характер погружения и работают в переменном режиме. Общая высота рассматриваемого водоносного слоя до низа скважин составила 22,7 м. Подземный водоносный слой является однотипным для скважин, в верхней части ограничен глиной и представлен кварцево-полевошпатовыми мелко-среднезернистыми песками, которые содержат смесь чистого кварца (SiO<sub>2</sub>) порядка 60% и полевых шпатов из породобразующих алюминиевых минералов в виде железа, кальция, натрия, калия, реже бария, в которых 18–20% Fe(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)<sub>3</sub>, а остальное Ca(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)<sub>2</sub>, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> и KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

В данных скважинах подземная вода рассматривается как бескислородная и малосульфитная среда с величинами pH=7,2–8,0 и Eh=54–87 мВ. Состав ее не удовлетворяет требованиям СанПиН 10-124-99 РБ по содержанию общего железа до 3 мг/дм<sup>3</sup> (двухвалентное железо – 2,51 мг/дм<sup>3</sup>). На пределе находится концентрация общей жесткости – 6,8 мг-экв/дм<sup>3</sup>. Дополнительно, концентрация марганца составляет в среднем 0,1–0,16 мг-экв/дм<sup>3</sup>, аммонийных солей – 0,2–0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Метод обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ* в исполнении системы *Subterra* был реализован 2022–2024 гг. [2]. Сущность этого метода состоит в том, что в каждой отдельной скважине, непосредственно внутри водоносного пласта, происходят все стадии процесса обработки подземных вод: закачка обогащенной кислородом (воздуха) воды непосредственно в подземный водоносный пласт и, после окисления и образования гидроксида железа, дальнейшая ее откачка в систему водоснабжения малого населенного пункта.

**Экологические аспекты внутрипластовой обработки подземных вод.**

**Зоны санитарной охраны.** Рассмотрим зоны санитарной охраны (ЗСО) источников централизованного водоснабжения, в данном случае двух скважин, основной целью которых является создание и обеспечение режима их функционирования, а также защита от загрязнений на территории, где они расположены.

Согласно данным<sup>1,2</sup>, границы первого пояса ЗСО водозабора подземных вод должны устанавливаться от источника водозабора на расстоянии не менее: 30 м – при использовании защищенных подземных вод; 50 м –

<sup>1</sup> Постановление Министерства здравоохранения РБ от 30.12.2016 г. № 142 Об утверждении Санитарных норм и правил «Санитарные нормы и правила. Требования к организации зон санитарной охраны источников и централизованных систем питьевого водоснабжения». – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21731715p> (дата обращения: 03.09.2024).

<sup>2</sup> Постановление Министерства здравоохранения РБ от 16.12.2015 № 125 Об утверждении Санитарных норм и правил «Санитарно-эпидемиологические требования к охране подземных водных объектов, используемых в питьевом водоснабжении, от загрязнения». – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21530493p> (дата обращения: 10.09.2024).

при использовании недостаточно защищенных подземных вод. Если в группе подземных водозаборов расстояние между скважинами более 30 м и 50 м для защищенных и недостаточно защищенных подземных вод соответственно, первый пояс для скважин огораживается отдельно.

Для осуществления экспериментов по обработке подземной воды в водоносном пласте между скважинами проложены трубопроводы. Учитывая, что с других сторон скважин каких-либо встраиваемых сооружений и коммуникаций не производилось, то приняты вышеперечисленные положения. Тогда санитарной охраны будет не менее 30 м в стороны от каждой (для защищенных подземных вод), т.е. общие размеры экспериментальной площадки составили 42×30 м.

Согласно пояснительной записке проекта ЗСО скважин произведен расчет параметров второго и третьего поясов по величинам  $T_m$  (время, достаточное для утраты патогенными и болезнетворными микроорганизмами жизнеспособности и вирулентности) и  $T_x$  (время, в течение которого химический состав подземной воды будет оставаться стабильным на протяжении расчетного срока эксплуатации) с нанесением гидрогеологических профилей по характерным направлениям в пределах области питания водозабора.

Установлено также<sup>3</sup>, что скважины не расположены в местах, подвергаемых почвенной деформации или заболоченных и затопляемых паводковыми водами, а также ближе 30 м от магистралей с интенсивным движением транспортных средств.

**Окислительная зона.** В математической модели внутрислоевой обработки воды одиночной скважины совершенного типа предполагается [2; 3], что предварительно созданная окислительная зона, образующаяся при закачке обогащенной кислородом воды в водоносный слой, имеет вид цилиндра с высотой, равной его мощности, в который закачивается эта обогащенная вода, и осью, совпадающей со скважиной. Существует два радиуса этой зоны – фронт поршневого вытеснения кислорода и его адсорбции к моменту окончания закачки воды в скважину. Фактически окислительная зона представляет собой в разрезе эллипсоид, где различаются радиусы с минимальным, средним и максимальным значением.

Однако рассматриваемые скважины имеют несовершенный характер с устройством фильтра. Тогда можно предположить, что в окислительной зоне минимальные указанные радиусы близки к 0 в точках сопряжения с верхним водоупорным слоем, в средней части скважины – равные, как в цилиндре, а в нижней фильтровой будут максимальными по длине фильтра.

Для определения этих радиусов воспользуемся формулами:

$$r_f^* = r_f(t_3) = \sqrt{r_0^2 + 2q_3 t_3 / n_0}; \quad (1)$$

$$R_0 = r^*(t_3) = \sqrt{r_0^2 + 2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{o_2})}; \quad (2)$$

$$\Gamma_{o_2} = \frac{n_0 \xi}{C_{o_2_0} + \xi}, \quad (3)$$

где  $r_f^* = r_f(t_3)$  – расстояние от оси скважины до границы фронта поршневого вытеснения кислорода, м, в момент времени  $t = t_3$ ;

$R_0$  – расстояние от оси скважины до границы фронта адсорбции кислорода к моменту окончания закачки, м;

$r_0$  – радиус скважины, 0,11 м;

$q_3$  – расход воды на закачку обогащенной кислородом воды в подземный пласт, 2,5 м<sup>3</sup>/ч;

$t_3$  – продолжительность закачки, 120 ч;

$n_0$  – пористость песчаного водоносного слоя, 0,32 в долях единицы;

$\Gamma_0$  – константа адсорбции Генри;

$C_{o_2_0}$  – средняя концентрация кислорода в закачиваемой воде, 7 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>;

$\xi$  – вспомогательная величина.

Для рассматриваемого случая, используя расчетный математический продукт<sup>4</sup> при  $\Gamma_0 = 0,135$ , получаем:

– минимальные радиусы  $R_0$  и  $r_f^* \rightarrow 0$ ;

– средние радиусы  $R_0 = 3,03$  м,  $r_f^* = 3,6$  м;

– максимальные радиусы  $R_0 = 6,45$  м,  $r_f^* = 7,69$  м.

Таким образом, можно считать, что окислительная зона не будет влиять на размеры площадки зоны первого пояса санитарной охраны.

**Уровни воды в скважинах.** Исследуемые скважины работали попеременно. Уровни воды в скважинах измерялись до эксперимента (апрель 2022 г.) и в его период. Для замера использовался уровнемер скважинный УС-50

<sup>3</sup> См. сноску 2.

<sup>4</sup> Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1781-КП «Модель применения метода внутрислоевой обработки подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов».

с латунным датчиком 6–10 мм через штуцер в оголовке диаметром 25 мм. Статический и динамический уровни замерялись в ходе экспериментов в апреле каждого года через сутки при остановке или запуске насоса каждой скважины. Для замера выбиралось время не менее недели после окончания дождевой погоды. Расход воды устанавливался и замерялся водомером скважины. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты измерений уровня скважин

Год	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	Уровни воды в скважине, м		Примечание
		№ 1	№ 2	
Год ввода в эксплуатацию	–	1986	2020	Дебит каждой скважины 10 м <sup>3</sup> /ч
Апрель 2022	0	4,6	2,9	Продолжительность переключения каждого режима не менее 2-х часов
	2	5,5	4,0	
	4	8,4	5,1	
	6	11,9	6,4	
Апрель 2023	0	5,8	3,5	Скважина № 2 является основной для внутрипластовой обработки воды
	2	6,9	3,8	
	4	8,7	4,9	
	6	10,4	6,0	
Апрель 2024	0	5,3	3,0	
	2	7,0	3,3	
	4	9,2	4,2	
	6	11,3	5,7	

Полученные данные показывают, что за период 2022–2024 гг. происходило незначительное колебание уровня воды, особенно в скважине № 2, которая являлась основной заливной скважиной с последующей откачкой воды в водопроводную сеть малого населенного пункта.

**Возможность кольтматации водоносной породы.** Возможность кольтматации песчаного водоносного слоя с продуктами окислов железа вокруг фильтра скважины рассмотрим на примере расчета ее степени по методике В.В. Кулакова [4]. Условия и исходные данные, принимаемые в расчет:

- мощность водоносного горизонта – 22,7 м;
- среднее содержание железа в подземной воде – 2,5 мг/дм<sup>3</sup>;
- содержание железа в откачиваемой воде – 0 мг/дм<sup>3</sup>;
- среднее водопотребление малого населенного пункта – до 35 м<sup>3</sup>/сутки;
- средний радиус зоны осаждения нерастворимого железистого осадка вокруг скважины (в виде цилиндра) – 3,0 м;
- пористость – 0,32 (в т.ч. активная пористость – 0,16, неактивная пористость – 0,16);
- объемная плотность осадка (гетита) в порах пласта – 5 г/см<sup>3</sup> (т/м<sup>3</sup>);
- расчетный срок эксплуатации водозабора (скважины) – 20000 суток (55 лет).

Принято, что отложение осадка соединений железа происходит в неактивных порах пласта.

1. Определяем количество железа, которое будет отложено в водоносном пласте и объем этого осадка:

$$35 \cdot 20000 \cdot 2,5 = 1,76 \text{ тонн};$$

$$1,76 : 5 = 0,35 \text{ м}^3.$$

2. Определяем объем пор (пустот) в водоносном горизонте вблизи скважины:

$$3,14 \cdot (3)^2 \cdot 22,7 \cdot 0,32 = 205 \text{ м}^3.$$

Из них активных (мобильных) пор – около 103 м<sup>3</sup>, а неактивных (немобильных) пор – около 102 м<sup>3</sup>. Тогда в течение расчетного срока эксплуатации будет заполнено всего 0,35% объема неактивных пор водоносного горизонта (0,35:102·100).

**Закключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Первый пояс санитарной охраны скважин определен исходя из условия, что с различных сторон их расположения каких-либо встраиваемых и посторонних сооружений, а также коммуникаций не имеется, равным 42×30 м. Кроме этого, скважины не расположены в местах, подвергаемых почвенной деформации или заболоченных и затапливаемых паводковыми водами, а также ближе 30 м от магистралей с интенсивным движением транспортных средств.

2. Установлено, что окислительная зона не будет влиять на размеры площадки зоны первого пояса санитарной охраны.

3. За период 2022–2024 гг. проведения экспериментов происходило при откачке воды из скважин на водопроводную сеть незначительное сезонное колебание уровней воды, т.е. кольтматации подземного водоносного слоя вокруг фильтров не происходило.

4. Произведен расчет возможной кольтматации водоносного слоя. Установлено, что в течение расчетного срока эксплуатации (55 лет) будет заполнено всего 0,35% объема неактивных пор водоносного слоя, что значительно менее максимальной величины загрязнений, принятых в наземных фильтрах в 4%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудельский А.В., Пашкевич В.И. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси. – Минск: Бел. наука, 2014. – 261 с.
2. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Применение метода внутрипластовой обработки подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов // Сб. науч. ст. по итогам работы Междунар. науч. форума «Наука и инновации – современные концепции» / г. Москва (11 апреля 2024 г.). – Т. 2. – М: Инфинити, 2024. – С. 215–223.
3. Рашкевич Е.И. Определение основных расчетных параметров процесса внутрипластовой обработки подземных вод и оценка их эффективности для малых населенных пунктов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). – С. 64–71.
4. Кулаков В.В., Архипов Б.С., Козлов С.А. Методические рекомендации по опытно-технологическим исследованиям условий обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном горизонте. – Хабаровск: Дальгеоцентр, 1999. – 61 с.

## REFERENCES

1. Kudel'skii A.V. & Pashkevich, V.I. (2024). *Regional'naya gidrogeologiya i geokhimiya podzemnykh vod Belarusi*. Minsk: Bel. navuka. (In Russ).
2. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2024). *Primenenie metoda vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod v sistemakh vodosnabzheniya mal'nykh naseleennykh punktov. Sb. nauch. st. po itogam raboty Mezhdunar. nauch. foruma «Nauka i innovatsii – sovremennye kontseptsii», 2, 215–223.* (In Russ).
3. Rashkevich, E.I. (2024). *Opredelenie osnovnykh raschetnykh parametrov protsessa vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod i otsenka ikh effektivnosti dlya mal'nykh naseleennykh punktov* [Determination of the main design parameters of the process of in-situ groundwater treatment and assessment of their effectiveness for small settlements]. *Vestn. Polotsk gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 2(37), 64–71. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Kulakov, V.V., Arkhipov, B.S. & Kozlov, S.A. (1999). *Metodicheskie rekomendatsii po opytно-tekhnologicheskim issledovaniyam uslovii obezhelezivaniya i demanganatsii podzemnykh vod v vodonosnom gorizonte*. Khabarovsk: Dal'geotsentr. (In Russ.).

Поступила 06.10.2024

## ENVIRONMENTAL ASPECTS OF IN-SITU GROUNDWATER TREATMENT IN WELLS FOR SMALL SETTLEMENTS

**H. RASHKEVICH**

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

*The article describes the characteristics of sandy aquifers, the formation of sanitary zones of wells, the creation of an oxidizing zone of wells, measurements of water levels and their annual precipitation were made, the calculation of the colmatation of the aquifer was performed.*

**Keywords:** *groundwater aquifers and horizons, sanitary protection zones, oxidation zone, water levels in wells, calculation of aquifer colmatation.*