

УДК 628.11(628.16)

DOI 10.52928/2070-1683-2024-37-2-64-71

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

**Е.И. РАШКЕВИЧ**

(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие  
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»  
selenaruko@gmail.com)

*В статье рассмотрены пути определения расчетных параметров при использовании метода внутрипластовой обработки воды для малых объемов водопотребления. Полученные экспериментальные данные подтверждают правильность таких подходов и могут быть рекомендованы для предварительных расчетов и оценки эффективности этого метода.*

**Ключевые слова:** константа скорости окисления железа, предельная адсорбционная емкость пород по отношению к кислороду, продолжительность защитного периода откачки воды из скважины, экспериментальные данные, оценка эффективности метода.

**Введение.** Водоснабжение населенных пунктов в Республике Беларусь осуществляется подземной водой. Для сельских населенных пунктов, включая агрогородки, особенностью систем водоснабжения является сравнительно небольшое водопотребление 40–300 м<sup>3</sup>/сут, причем с резко изменяющимся расходом по часам суток. Практически на всей территории республики отмечается присутствие железа и его соединений в составе подземных вод, что часто является основной задачей при их очистке.

УП «Витебскоблводоканал» ведутся исследования по использованию для водоочистки подземных вод малых населенных пунктов метода обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин in-situ в исполнении системы Subterra. Сущность метода состоит в том, что в каждой отдельной скважине, непосредственно внутри водоносного пласта, происходят все стадии процесса обработки подземных вод [1–4]. Вначале осуществляется закачка обогащенной кислородом воздуха воды непосредственно в водоносный слой. После закрепления кислорода воздуха на породах пласта (их «зарядка») и создания внутрипластовой зоны окисления железа производится откачка воды из скважины в водопроводную сеть.

Г.М. Коммунаром в 80-х годах прошлого столетия была разработана математическая модель процессов, происходящих при применении данного метода. Эта модель описана в [4, глава 21], но в ней не приводится ряд существенных промежуточных выкладок, а определение входящих в нее неизвестных параметров производится на основе экспериментальных данных с использованием достаточно искусственного графоаналитического метода, что затрудняет ее практическое использование.

Поэтому был разработан другой путь решения поставленной задачи [5; 6], где предложен для определения входящих в нее неизвестных параметров на основе экспериментальных данных вместо графоаналитического метода регрессионный подход, допускающий программную реализацию, что позволяет обосновать методику расчета внутрипластовой обработки подземных вод in-situ для водоснабжения малых населенных пунктов.

На основе данных по мощности и характеристики водоносных песчаных слоев, предполагаемой концентрации кислорода в закачиваемой воде в скважину и ее объема, производительности системы водоснабжения и исходного состава подземной воды появляется возможность предварительно определить основные параметры рассматриваемого метода с получением конечного результата – продолжительности защитного периода откачки воды в водопроводную сеть и коэффициента полезности, представляющего собой отношение объемов откаченной и закаченной воды в скважине.

**Цель работы.** На основании получения и анализа математической модели удаления железа при внутрипластовой обработке подземных вод [5; 6] предложить пути определения основных расчетных величин и в процессе «зарядки» кислородом водовмещающих пород, а именно:

- константа скорости окисления железа  $\sigma_{Fe^{2+}}$ , (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>;
- независимая вспомогательная величина  $\xi$  для определения предельной адсорбционной емкости пород по отношению к кислороду  $C_{O_2}^*$ ;
- продолжительность защитного периода откачки воды из скважины  $t_d$ , ч (сут).

**Определение величин**  $\sigma_{Fe^{2+}}$ ,  $\xi$  и  $t_d$ . Математическая модель удаления железа при внутрипластовой обработке подземных вод содержит две неизвестные величины  $\sigma_{Fe^{2+}}$  и  $C_{O_2}^*$ , которые в каждом конкретном случае должны быть определены на основе экспериментальных данных. Для величины  $C_{O_2}^*$  использование каких-либо справочных значений проблематично, так как она сильно зависит от внутреннего строения и химического состава

пород водоносного пласта и может отличаться друг от друга даже в близко расположенных скважинах. Но непосредственное определение предельной адсорбционной емкости пород по отношению к кислороду  $C_{O_2}^*$  по экспериментальным данным также затруднительно, поэтому более удобным для ее определения может быть введение вспомогательной величины  $\xi$  :

$$\xi = C_{O_{20}} \Gamma_{O_2} / (n_0 + \Gamma_{O_2}) = \frac{C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}}, \quad (1)$$

где  $C_{O_{20}}$  – начальная концентрация растворенного кислорода в закачиваемой воде в скважину, мг $O_2$ /дм $^3$ ;  
 $n_0$  – пористость водоносного пласта (объем пор в единице объема породы, безразмерная величина);  
 $\Gamma_{O_2}$  – константа адсорбции Генри, определяемая по формуле:

$$\Gamma_{O_2} = \frac{C_{\bar{O}_2}^*}{C_{O_{20}}}. \quad (2)$$

При вычислении величин  $\sigma_{Fe^{2+}}$  и  $\xi$  необходимо иметь ряд значений величины  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$ , которая представляет собой измеренную концентрацию двухвалентного железа в откачиваемой воде на выходе из скважины, а также соответствующие значения объемов откачанной воды, либо (при постоянной интенсивности откачки) момент времени, в который данные концентрации измерены. Обработку этих данных предложено осуществлять с помощью графоаналитического метода [2], который оказался не только трудоемким, но и не допускающим программной реализации. В связи с этим представляется целесообразным заменить его подходом, основанным на построении линейной регрессии.

В найденном решении [1], фиксируя значение независимой переменной  $r = r_0$ , получим концентрацию двухвалентного железа на выходе из скважины, в которую производится закачка воды, обогащенной кислородом воздуха:

$$\frac{C_{Fe^{2+}}(t, r_0)}{C_{Fe_0^{2+}}} = \frac{e^{T_0}}{e^{X_0} + e^{T_0} - 1} = \frac{1}{(e^{X_0} - 1)e^{-T_0} + 1}, \quad (3)$$

где величины  $T_0$  и  $X_0$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} T_0 &= \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}} \left( t - t^* - \frac{n_0}{2q_0} (R_0^2 - r_0^2) \right); \\ X_0 &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{2q_0} (R_0^2 - r_0^2). \end{aligned} \quad (4)$$

В этих формулах:

$B$  – массовое количество кислорода (мг) для окисления 1 мг железа, равно 0,143;

$R_0$  – радиус цилиндра, в котором происходит равномерное распределение кислорода по водоносному пласту при конечном объеме закачки в него воды (радиус фронта адсорбции), м;

$C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$  – радиус скважины, м;

$C_{Fe_0^{2+}}$  – начальная концентрация двухвалентного железа, мг/дм $^3$ .

По определению имеем:

$$R_0^2 = r_0^2 + 2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2}), \quad (5)$$

откуда находим разность квадратов:

$$R_0^2 - r_0^2 = 2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2}). \quad (6)$$

Подставим это значение разности в выражения для  $X_0$ :

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{2q_0} (2q_3 t_3 / (n_0 + \Gamma_{O_2})) = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{q_3}{q_0} t_3 = \\ &= \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{Q_3 t_3}{Q_0} = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} t^*, \end{aligned} \quad (7)$$

В этих формулах использованы следующие обозначения:

$$q_3 = Q_3 / 2\pi M; \quad q_0 = Q_0 / 2\pi M; \quad t_0^* = Q_3 t_3 / Q_0,$$

где  $Q_3$  и  $Q_0$  – расходы при закачке и откачке воды в скважине, м<sup>3</sup>/ч;

$t_3$  и  $t_0$  – продолжительность закачки и откачки;

$t^*$  – продолжительность, за которую частицы воды в процессе откачки проходят путь от радиуса фронта адсорбции  $r_f^*$  в момент времени  $t$  до максимального его значения  $R_0$ , численно равная максимальному значению величины  $t_3$ , ч;

$t^{**}$  – продолжительность, в течение которой (в случае мгновенной адсорбции кислорода) при откачке будет отобрана вся вода с концентрацией кислорода, равной начальной концентрации  $C_{O_2}$ , численно равная максимальному значению величины  $t_0$ , ч;

$M$  – мощность пласта, м.

Далее подставим найденное значение разности квадратов в выражения для  $T_0$ :

$$\begin{aligned} \frac{T_0}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}}} &= t - t^* - \frac{n_0}{2q_0} \cdot \frac{2q_3 t_3}{n_0 + \Gamma_{O_2}} = t - t^* - \frac{n_0}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{q_3 t_3}{q_0} = \\ &= t - t^* - \frac{n_0}{n_0 + \Gamma_{O_2}} \cdot \frac{Q_3 t_3}{Q_0} = t - t^* - \frac{n_0}{n_0 + \Gamma_{O_2}} t_0^* = t - t^* - t_0^{**} = t^* - t_0^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где дополнительно использовано:

$$\begin{aligned} t_0^{**} &= t_0^* \frac{\Gamma_{O_2}}{n_0 + \Gamma_{O_2}}; \\ t^* &= Q_3 t_3 \Gamma_{O_2} / Q_0 (n_0 + \Gamma_{O_2}) = t_0^* \frac{\Gamma_{O_2}}{n_0}. \end{aligned}$$

В итоге имеем:

$$X_0 = \frac{\sigma_{Fe^{2+}} C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}} t_0^* = \sigma_{Fe^{2+}} \xi t_0^*; \quad T_0 = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe_0^{2+}} (t - t_0^*), \quad (9)$$

где принята независимая вспомогательная величина  $\xi$ :

$$\xi = \frac{C_{\bar{O}_2}^*}{n_0 + \Gamma_{O_2}}. \quad (10)$$

Введем вспомогательную переменную величину  $Y$  на выходе из скважины  $r = r_0$ :

$$\begin{aligned} Y(t, r_0) &= \ln \left( \frac{C_{Fe_0^{2+}}}{C_{Fe^{2+}}(t, r_0)} - 1 \right) = \ln \left( (e^{X_0} - 1) e^{-T_0} + 1 - 1 \right) = \ln \left( (e^{X_0} - 1) e^{-T_0} \right) \\ &= \ln(e^{X_0} - 1) + \ln(e^{-T_0}) = \ln(e^{X_0} - 1) - T_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставляя сюда найденное значение  $T_0$ , получим:

$$Y(t, r_0) = \ln(e^{X_0} - 1) - T_0 = \ln(e^{X_0} - 1) - \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} (t - t_0^*). \quad (12)$$

Таким образом, величина  $Y(t, r_0)$  линейно зависит от времени при условии, что  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$  удовлетворяет системе уравнений (1), (2) [1]. Естественно, измеренные значения  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$  содержат отклонения от такой зависимости, вызванные как погрешностями измерения, так и неполным соответствием между реальными условиями и предположениями модели. По общему правилу наибольшие искажения будут иметь место при малых значениях  $C_{Fe^{2+}}(t, r_0)$ .

Вывод: начальный, наиболее зашумленный, отрезок данных на основе их предварительного анализа, который необходимо проводить в каждом конкретном случае, нужно отбросить.

Вычисляя линейную регрессию незашумленной части данных будем иметь:

$$Y(t, r_0) = a - b(t - t_0^*).$$

Тогда:

$$b = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}; \quad a = \ln(e^{X_0} - 1). \quad (13)$$

При больших значениях  $X_0$  (в [3] рекомендуется уже при  $X_0 > 3$ ) будет приближенно выполняться равенство:

$$a \approx X_0,$$

так как  $a \approx \ln(e^a + 1)$  при достаточно больших  $a$ . Если  $a > 3$ , то имеем  $0 < a - \ln(e^a - 1) < 0,052$ .

При известных значениях  $\beta$  и  $C_{Fe^{2+}}$  находим искомое выражение для  $\sigma_{Fe^{2+}}$ :

$$\sigma_{Fe^{2+}} \approx \frac{b}{\beta C_{Fe^{2+}}}. \quad (14)$$

Затем, имея в наличии величину  $\sigma_{Fe^{2+}}$  и соотношение (9), получим:

$$t_0^* = Q_3 t_3 / Q_0; \quad \sigma_{Fe^{2+}} \approx \frac{b}{\beta C_{Fe^{2+}}}; \quad X_0 = \ln(e^a + 1). \quad (15)$$

И в итоге определяем вспомогательную величину  $\xi$ :

$$\xi = \frac{X_0}{\sigma_{Fe^{2+}} t_0^*} = \frac{\ln(e^a + 1)}{\sigma_{Fe^{2+}} t_0^*}. \quad (16)$$

По найденной величине  $\xi$  определим из выражения (10) предельную адсорбционную емкость пород по отношению к кислороду  $C_{O_2}^*$ .

После того, как определены величины  $\sigma_{Fe^{2+}}$ ,  $\xi$  и  $C_{O_2}^*$ , можно вычислить продолжительность защитного периода  $t_D$  и коэффициент эффективности (полезности)  $K$ , что позволит выполнить оценку эффективности применения метода обезжелезивания воды непосредственно в водоносном пласте скважин *in-situ*.

**Вычисление продолжительности защитного периода  $t_D$ .** Коэффициент эффективности (полезности)  $K$  связан с величиной  $t_D$  равенством:

$$K = \frac{Q_0 t_D}{Q_3 t_3}. \quad (17)$$

Примем величину  $t_D$  как продолжительность достижения ПДК по общему железу в откачиваемой воде из скважины ( $0,3 \text{ мг/дм}^3$ ), тогда при  $C_{Fe^{2+}}(t_D, r_0) = C_D$  получим на выходе из скважины:

$$\frac{C_D(t, r_0)}{C_{Fe^{2+}}} = \frac{e^{T_D}}{e^{X_0} + e^{T_D} - 1} = \frac{1}{(e^{X_0} - 1)e^{-T_D} + 1}, \quad (18)$$

где вспомогательная величина  $T_D$ :

$$T_D = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} \left( t_D - t^* - \frac{n_0 (R_0^2 - r_0^2)}{2q_0} \right); \quad (19)$$

$C_D$  – нормативная концентрация железа в откачиваемой воде по СанПиН 10.124-99 РБ, равная  $0,3 \text{ мг/дм}^3$ , с фиксацией значения независимой переменной  $r = r_0$ , и последовательно имеем следующие равенства:

$$\begin{aligned} (e^{X_0} - 1)e^{-T_D} &= \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1; \\ e^{-T_D} &= \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) (e^{X_0} - 1)^{-1}; \\ e^{T_D} &= \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right)^{-1} (e^{X_0} - 1), \end{aligned} \quad (20)$$

или после логарифмирования обеих частей:

$$T_D = \ln(e^{X_0} - 1) - \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right).$$

Ранее для величины  $T_0$  была получена формула (9), из которой в нашем случае при  $C_{Fe^{2+}} = C_D$ ,  $t = t_D$  имеем:

$$T_D = \beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}} (t_D - t_0^*),$$

откуда:

$$t_D = \frac{T_D}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} + t_0^*. \quad (21)$$

Подставив найденное выше значение  $T_D$ , окончательно имеем:

$$\begin{aligned} t_D &= \frac{\ln(e^{X_0} - 1) - \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right)}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} + t_0^* = \\ &= \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln(e^{X_0} - 1) - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) + t_0^*. \end{aligned} \quad (22)$$

Далее выполним анализ этого уравнения на два случая.

1. При больших значениях  $X_0$  ( $\geq 3$ ) имеем приближенное равенство:

$$X_0 \approx \ln(e^{X_0} - 1) = \sigma_{Fe^{2+}} \xi t_0^*$$

Поэтому:

$$\begin{aligned} t_D &= t_0^* + \frac{\xi}{\beta C_{Fe^{2+}}} t_0^* - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) = \\ &= \left( 1 + \frac{\xi}{\beta C_{Fe^{2+}}} \right) t_0^* - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right) = A t_0^* - B, \end{aligned} \quad (22a)$$

где:

$$A = 1 + \frac{\xi}{\beta C_{Fe^{2+}}}; \quad B = \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right),$$

что совпадает с соответствующими формулами (1), (3).

2. Если  $X_0$  невелико, то имеем только формулу вида:

$$t_D = t_0^* + \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( e^{\sigma_{Fe^{2+}} \xi t_0^*} - 1 \right) - \frac{1}{\beta \sigma_{Fe^{2+}} C_{Fe^{2+}}} \ln \left( \frac{C_{Fe^{2+}}}{C_D(t, r_0)} - 1 \right). \quad (22b)$$

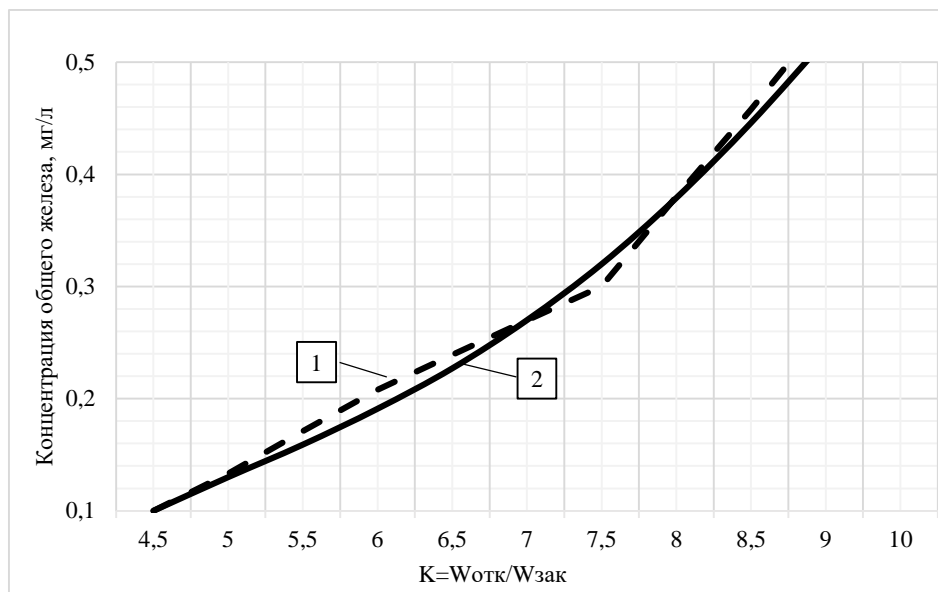
**Экспериментальные исследования.** Исследования по внутрипластовой обработке подземных вод проводились на скважинах малого населенного пункта (Докшицкий район, Витебская область). Суточная производительность водопотребления составила до 50 м<sup>3</sup>/сут. Начальная концентрация кислорода в закачиваемой воде была равна 7 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Водоносный слой состоял из смеси пылевидных и мелко-среднезернистых полиминеральных кварцево-полевошпатовых песков с эквивалентным диаметром 0,3 мм и пористостью порядка 0,32. Исходная концентрация железа составила порядка 3 мг/дм<sup>3</sup>. Попыты по откачке воды из скважин проводились до достижения концентрации железа в 0,5–0,6 мг/дм<sup>3</sup>. Объем закачки  $W_{зак}$  обогащенной кислородом воды в скважину был принят 100 и 300 м<sup>3</sup>, расход воды на всех стадиях процесса колебался в пределах 2,3–2,5 м<sup>3</sup>/ч. На основании проведенных исследований были получены экспериментальные данные по объему откаченной из скважины подземной воды  $W_{отк}$ . Для каждого случая проведено несколько циклов закачки-откачки. Средние показатели циклов представлены на рисунках 1 и 2.

После получения этих данных, исходя из исходных показателей, были произведены математические расчеты с использованием программ Excel и Maple по определению основных параметров применяемого метода очистки подземных вод.

В первом случае (закачка  $W_{зак} = 100$  м<sup>3</sup>), при остаточной концентрации железа до 0,3 мг/дм<sup>3</sup> в откаченной из скважины подземной воде, расчетные величины составили  $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,21 \cdot 10^{-1}$  (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>,  $\xi = 5,206$  и в конечном итоге  $t_D = 307,94$  ч или  $W_{отк} = 728$  м<sup>3</sup> ( $K=7,28$ ) при фактическом объеме 752 м<sup>3</sup>. Ошибка в рассматриваемых объемах составила 3,5%, что меньше общепринятой величины в технических расчетах – 5%.

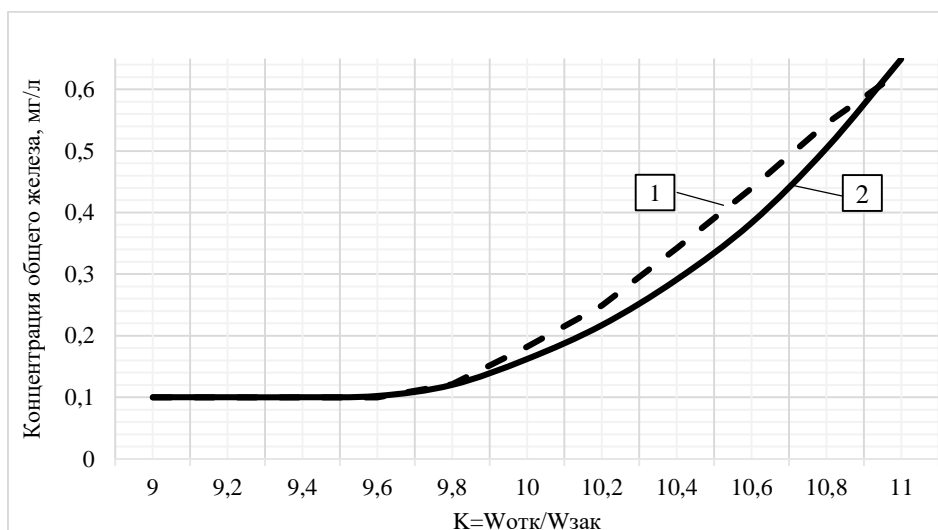
Аналогично для второго случая (закачка  $W_{зак} = 300$  м<sup>3</sup>):  $\sigma_{Fe^{2+}} = 0,306 \cdot 10^{-1}$  (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>,  $\xi = 4,63$  и в конечном итоге  $t_D = 1250,53$  ч или  $W_{отк} = 3120$  м<sup>3</sup> при фактическом объеме 3060 м<sup>3</sup>. Ошибка в рассматриваемых объемах составила 1,9%.

Следует отметить, что константа скорости окисления железа  $\sigma_{Fe^{2+}}$ , (мг ч/дм<sup>3</sup>)<sup>-1</sup> увеличивается с ростом объема закаченной воды в скважину.



1 – экспериментальные данные; 2 – математические расчеты

Рисунок 1. – График зависимости изменения концентрации остаточного железа в откаченной из скважины подземной воде от коэффициента полезности внутрипластового метода при закачке в нее  $W_{зак} = 100 \text{ м}^3$



1 – экспериментальные данные; 2 – математические расчеты

Рисунок 2. – График зависимости изменения концентрации остаточного железа в откаченной из скважины подземной воде от коэффициента полезности внутрипластового метода при закачке в нее  $W_{зак} = 300 \text{ м}^3$

**Заключение.** Приведенные расчеты позволяют определить основные величины и выполнить оценку эффективности использования метода обработки подземных вод непосредственно в песчаных водоносных слоях для малых населенных пунктов.

Таким образом, при рассмотрении возможности применения данного метода для предварительно выбранного объекта малого водопотребления можно, используя исходные данные и задаваясь объемами закачки воды, выполнить расчет с определением в конечном итоге коэффициента его полезности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуринович А.Д., Ваврженюк П., Ельский И. Возможности удаления из воды железа в водоносном пласте на примере существующих водозаборных скважин // Вода и экология: проблемы и решения. – 2013. – Т. 2, № 54. – С. 12–20.
2. Ahmad M. Iron and manganese removal from groundwater. Geochemical modeling of the Vyredox method. – Oslo, 2012. – С. 101.
3. 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.
4. Плотников Н.А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.

5. Уточненная математическая модель «зарядки» кислородом водовмещающих пород в процессе внутрислоевой обработки подземных вод / Е.И. Рашкевич, В.Д. Ющенко, Е.К. Макаров и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2023. – № 2(34). – С. 38–46. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-38-46.
6. Математическая модель удаления железа в процессе внутрислоевой обработки подземных вод / Е.И. Рашкевич, В.Д. Ющенко, Е.К. Макаров и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Приклад. науки. – 2024. – № 1(36). – С. 2–13. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-2-13.
7. Степанов В.В. Курс дифференциальных уравнений. – М.: УПСС, 2006. – 472 с.

## REFERENCES

1. Gurinovich, A.D., Vavrzhenyuk, P. & El'skii, I. (2013). *Vozmozhnosti udaleniya iz vody zheleza v vodonosnom plaste na primere sushchestvuyushchikh vodozabornykh skvazhin* [Technique of Water Deferrization in Water Bearing Bed by the Example of Existing Water Wells Water and Ecology]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], 2(54), 12–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Ahmad, M. (2012). Iron and manganese removal from groundwater. *Geochemical modeling of the Vredox method*. Oslo.
3. Kulakov, V.V., Arkhipov, B.S. & Kozlov, S.A. (1999). *Metodicheskie rekomendatsii po opytno-tekhnologicheskimi issledovaniyami uslovii obezhelezivaniya i demanganatsii podzemnykh vod v vodonosnom gorizonte*. Khabarovsk: Dal'geotsentr. (In Russ.).
4. Plotnikov, N.A. (1990). *Proektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
5. Rashkevich, E.I., Yushchenko, V.D., Makarov, E.K. & Demenchuk, A.K. (2023). *Utochnennaya matematicheskaya model' «zaryadki» kislородом vodovmeshchayushchikh porod v protsesse vnutrisloevoy obrabotki podzemnykh vod* [Analysis of the Mathematical Model of “Charging” Oxygen of Water-Bearing Rocks in the Process of in-situ Treatment of Groundwater]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki* [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences], 2(34), 38–46. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-38-46. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Rashkevich, E.I., Yushchenko, V.D., Makarov, E.K. & Demenchuk, A.K. (2024). *Matematicheskaya model' udaleniya zheleza v protsesse vnutrisloevoy obrabotki podzemnykh vod* [Mathematical Model of Iron Removal in the Process of in-situ Treatment of Groundwater]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki* [Vestnik of Polotsk State University, Part F. Constructions. Applied Sciences], 1(36), 2–13. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-36-1-2-13. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Stepanov, V.V. (2006). *Kurs differentsial'nykh uravnenii*. Moscow: URSS. (In Russ.).

Поступила 26.05.2024

**DETERMINATION OF THE MAIN DESIGN PARAMETERS OF THE PROCESS  
OF IN-SITU GROUNDWATER TREATMENT AND ASSESSMENT  
OF THEIR EFFECTIVENESS FOR SMALL SETTLEMENTS**

**H. RASHKEVICH**

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

*The article discusses ways to determine the design parameters when using the method of intra-layer water treatment for small volumes of water consumption. The experimental data obtained confirm the correctness of such approaches and can be recommended for preliminary calculations and evaluation of the effectiveness of this method.*

**Keywords:** *iron oxidation rate constant, the maximum adsorption capacity of rocks relative to oxygen, the duration of the protective period of pumping water from the well, experimental data, evaluation of the effectiveness of the method.*