

DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92

УДК 628.112

Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации

И. Е. Иванова¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, В. В. Веременик¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В процессе работы водозаборных скважин происходит снижение их удельного дебита в результате механического, биологического и химического кольматажа. Извлечение кольматанта из фильтра осложняется тем, что отложения охватывают не только фильтр скважины, но и гравийную обсыпку и не удаляются полностью при обработках. Предложена установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин, состоящая из компрессора, шлангов и погружного устройства, выполненного в виде двухкамерного пневматического насоса вытеснения. Преимуществом установки являются отсутствие в ее составе циркуляционного насоса и возможность эффективной обработки ограниченного интервала фильтра. Скважинное погружное устройство не содержит движущихся частей за исключением двух плавающих обратных клапанов. Для описания процесса растворения отложений способом реверсивно-реагентной регенерации скважин использована система уравнений: объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики. Путем интегрирования уравнения кинетики получена аналитическая зависимость для расчета продолжительности работы установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров, по истечении которой удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня. По полученным формулам была составлена компьютерная программа, позволяющая рассчитать количество циклов работы устройства, продолжительность очистки и степень удаления кольматанта на каждом этапе работы. С помощью разработанной компьютерной программы рассмотрена работа установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров на примере водозаборной скважины с использованием двух различных реагентов: соляной кислоты и дитионита натрия. Приведена методика расчета количества реагента, необходимого для восстановления производительности скважин.

Ключевые слова: регенерация, водозаборная скважина, кольматант, гравийный фильтр, реверсивно-реагентная обработка, реагент, соляная кислота, дитионит натрия

Для цитирования: Иванова, И. Е. Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин, В. В. Веременик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 80–92. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 268-84-50
gts@bntu.bu

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 268-84-50
gts@bntu.bu

Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration

I. E. Ivanova¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, V. V. Veremenyuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. During the operation of water wells, their specific production rate is reduced as a result of mechanical, biological and chemical colmatage. The extraction of the mudding element from the filter is complicated by the fact that the deposits cover not only the well filter, but also gravel package and are not completely removed by the treatment. An installation is proposed for reverse-reagent regeneration of water wells, consisting of a compressor, hoses and submersible device in the form of a two-chamber pneumatic displacement pump. The advantage of the unit is the absence of a circulating pump in its composition and the possibility of efficient processing of the limited filter interval. The downhole submersible device does not contain moving parts except for two floating check valves. In order to describe the process of dissolution of deposits by the method of reverse-reagent water well regeneration, a system of equations is used: the combined equation of motion and mass conservation and the generalized equation of kinetics. By integrating the kinetics equation, an analytical dependence is obtained to calculate the operating time of the unit for reverse-reagent filter regeneration, followed by the reducing of the specific volume of the colmatizing deposits in the gravel package to a predetermined level. According to the formulas obtained, a computer program was compiled, which allows calculating the number of operating cycles of the device, the duration of cleaning and the degree of removal of the colmatant at each stage of the work. With the aid of the developed computer program, the operation of the unit for reverse-reagent filter regeneration is considered on behalf of a water well using two different reagents: hydrochloric acid and sodium dithionite. The procedure for calculating the amount of reagent needed to restore water well productivity is presented.

Keywords: regeneration, water well, mudding element, gravel filter, reverse-reagent treatment, reagent, hydrochloric acid, sodium dithionite

For citation: Ivanova I. E., Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V. (2018) Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (1), 80–92. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92 (in Russian)

Введение

Хозяйственно-питьевое водоснабжение Республики Беларусь основано на подземных водах, для добычи которых в стране пробурено более 36 тыс. водозаборных скважин. Вместе с тем в настоящее время около 90 % скважин эксплуатационного фонда работает со сниженной производительностью, а их средний срок службы редко превышает 18–20 лет, что существенно ниже расчетных показателей. Это обусловлено тем, что в процессе работы скважин происходит снижение их удельного дебита в результате процессов механического, биологического и химического кольматажа. Проводимые в настоящее время мероприятия по декольматажу скважин импульсными методами не всегда эффективны из-за низкой степени извлечения отложений. Особенно это характерно для длительно эксплуатирующихся скважин, в которых отложения охватывают всю гравийную обсыпку и не удаляются полностью при обработках. Заслуживают внимания циркуляционные

методы регенерации [1–3], в которых химическое растворение отложений происходит более интенсивно, чем в режиме «реагентной ванны» и «циклического задавливания» реагента, где реагент неравномерно очищает фильтр из-за утечек в пласт через наиболее проницаемые участки [4].

Процесс выщелачивания кольматирующих отложений в гравийной обсыпке скважин рассматривается в литературе как химическая гетерогенная реакция, в ходе которой кристаллические связи компонентов кольматанта разрушаются, ионные связи разрываются и компоненты переходят в раствор. Такие реакции протекают в несколько стадий: перенос реагента (растворителя) к поверхности, на которой происходит реакция; собственно химическая реакция; отвод продуктов реакции от поверхности [4]. Общая продолжительность процесса зависит от скоростей отдельных стадий, причем определяющей является стадия, протекающая медленнее остальных. Результаты исследований кинетики растворения твердых веществ в жидкостях при различных гидродинамических условиях приведены в работах Г. А. Аксельруда и А. Д. Молчанова [5], Г. А. Аксельруда и В. М. Лысянского [6].

Технология регенерации фильтров циркуляционными скважинными устройствами не получила распространения из-за сложности и уникальности технологического оборудования. Поэтому разработка эффективных и достаточно простых в эксплуатации реагентных технологий для регенерации водозаборных скважин является актуальной задачей. В работе В. В. Ивашечкина, П. А. Автушко и В. В. Веремеюка [7] был описан процесс выщелачивания отложений при циркуляционном радиальном движении реагента через слой гравийной обсыпки.

В БНГУ предложена установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин, состоящая из компрессора, шлангов и погружного устройства, выполненного в виде двухкамерного пневматического насоса вытеснения [8]. Реагент здесь перемещается между двумя пневмокамерами насоса, установленными на разных уровнях по высоте фильтра, через слой обсыпки в вертикальном направлении. Преимуществом установки являются отсутствие в ее составе циркуляционного насоса и возможность эффективной обработки ограниченного интервала фильтра. Скважинное погружное устройство не содержит движущихся частей за исключением двух плавающих обратных клапанов.

Анализ литературы показал, что в ней отсутствуют методики расчета продолжительности процесса выщелачивания при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации. Поэтому цель исследований – разработать методику расчета продолжительности работы установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров, по истечении которой удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня.

Основная часть

Расчетная схема реверсивного движения фильтрового потока в гравийной обсыпке при использовании установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров представлена на рис. 1.

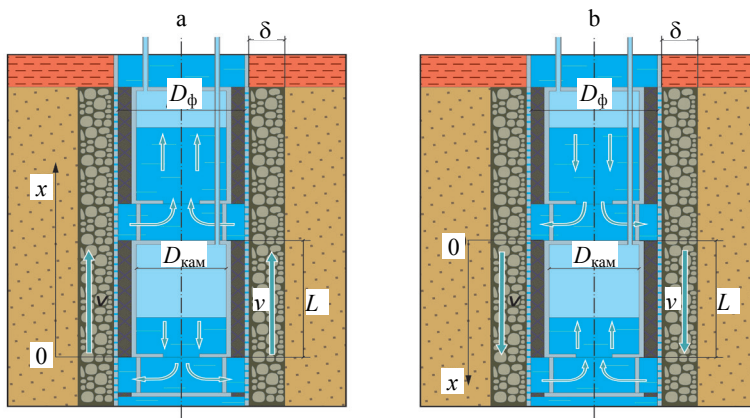


Рис. 1. Расчетная схема реверсивного движения фильтрового потока в гравийной обсыпке:
 а – восходящий поток; б – нисходящий поток

Fig. 1. The design scheme of the reverse motion of the filter flow in a gravel package:
 a – upward flow; b – down flow

Рассмотрим возвратно-поступательное движение реагента. Каждый цикл состоит из двух ходов: восходящее и нисходящее движение. По интенсивности движения ходы равноценные.

Первый ход (восходящее движение)

Для описания процесса растворения отложений в обсыпке фильтра при продавливании раствора реагента концентрации C со скоростью v на участке длиной L (рис. 1а) будем использовать объединенное уравнение движения и сохранения массы для линейного потока [9]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x} - \rho_{oc} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии; n_0 – начальная пористость грунта; b – удельная насыщенность грунта кольматантом, плотность которого ρ_{oc} .

Принимаем прифильтровую зону однородной, движение – квазиустановившимся. Согласно Н. Н. Веригину [10], при больших значениях критерия Пекле ($Pe = v_c d / D$), когда скорость фильтрации значительно больше скорости диффузии, в первом слагаемом этого уравнения принимают $D = 0$. Добавляем уравнение кинетики [4] и получаем систему:

$$\begin{cases} -v \frac{\partial C}{\partial x} - \rho_{oc} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}; \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi(C_m - C), \end{cases} \quad (2)$$

где C_m – максимальная концентрация солей в реагенте (концентрация насыщенного раствора); $\Phi = \frac{B_i}{\rho_{oc}} f(b)$; $f(b) = \frac{1}{\sqrt{1-n_0}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_0-b} - 1}$;

$$B_i = A_1 \left(\frac{D^4}{\nu_c} \right)^{1/6} \cdot \omega_0 \sqrt{\frac{\nu}{d_0}}; \quad A_1 - \text{константа, лежащая в интервале от } 0,760$$

до 0,996 [4]; D – коэффициент молекулярной диффузии; ν_c – коэффициент кинематической вязкости жидкости; ω_0, d_0 – удельная поверхность и размер зерен незакольматированной гравийной обсыпки скважины.

В выражение для расчета суммарной поверхности ω_0 зерен шаровой формы диаметром d_0 в единице объема $\omega_0 = 6 \frac{1-n_0}{d_0}$ [11] следует ввести понижающие коэффициенты ξ и ζ , учитывающие соответственно степень экранизации поверхности зерен пузырьками газа и долю нерастворимых соединений в составе кольматанта. Тогда $\omega_0 = 6\xi\zeta \frac{1-n_0}{d_0}$. Для решения конкретной задачи ставим начальные и граничные условия:

$$C(0, x) = C_0; \quad C(t, 0) = C_0; \quad b(0, x) = b_0 < n_0, \quad t \geq 0, \quad x \in [0; L]. \quad (3)$$

Для упрощения расчетов функцию $f(b)$ будем определять при среднем удельном объеме отложений b_c . Далее положим $\tilde{C}(t, x) = C_m - C(t, x)$ и преобразуем задачу (2), (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} + a \frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} + w \tilde{C} = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi_c \tilde{C}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{C}(0, x) = \tilde{C}(t, 0) = C_{01}; \quad C_{01} = C_m - C_0; \quad (6)$$

$$b(0, x) = b_0, \quad (7)$$

$$\text{где } a = \frac{\nu}{n_0}; \quad w = \frac{\alpha_1}{n_0}; \quad \alpha_1 = B_i f(b_c); \quad \Phi_c = \frac{\alpha_1}{\rho_{oc}}.$$

Задача (4) и (6) решается следующим образом. Приводим уравнение (4) к виду

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} + wu = 0, \quad (8)$$

удовлетворяющему условиям:

$$u(0, x) = u_0 = u(t, 0), \quad t \geq 0, \quad x \in [0; L]. \quad (9)$$

Коэффициенты a и w предполагаются постоянными.

Уравнения (8) и (9) решаются методом Лапласа и после преобразования принимают вид

$$u = u_0 e^{-\frac{wx}{a}} H\left(t - \frac{x}{a}\right) + u_0 e^{-wt} \left(H(t) - H\left(t - \frac{x}{a}\right) \right), \quad (10)$$

где $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ – функция Хевисайда.

Анализируя полученное выражение (10), делаем выводы:

$$1) \text{ пусть } T_x = \frac{x}{a}. \text{ Тогда } u = u_0 \cdot e^{-\frac{wx}{a}} \text{ при } t \geq T_x \text{ и любом } x \in [0; L]; \quad (11)$$

$$2) \text{ для любого } x \in [0; L] \text{ } u = u_0 \cdot e^{-wt} \text{ при } t < T_x. \quad (12)$$

Тогда согласно (11) и (12):

$$1) \tilde{C}(t, x) = C_{01} \cdot e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}} \text{ при } t \geq T_x \text{ и любом } x \in [0; L]; \quad (13)$$

$$2) \tilde{C}(t, x) = C_{01} \cdot e^{-wt} \text{ при } t < T_x \text{ и любом } x \in [0; L]. \quad (14)$$

Отметим, что величина $T_x = \frac{x}{a} = n_0 \frac{x}{v}$ имеет размерность времени.

Положим $T_0 = \frac{L}{v}$ – время, за которое расстояние L проходит со скоростью v . Тогда из (5), (7), (13), (14) находим удельную загрязненность в момент времени T_0 для любого $x \in [0; L]$

$$\begin{aligned} b(T_0, x) - b_0 &= -\Phi_c \int_0^{T_0} \tilde{C}(t, x) dt = -\Phi_c \int_0^{T_x} \tilde{C}(t, x) dt - \Phi_c \int_{T_x}^{T_0} \tilde{C}(t, x) dt = \\ &= -\frac{n_0 C_{01}}{\rho_{oc}} \left(1 - e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}} \right) - \frac{\alpha_1 C_{01} e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}}}{\rho_{oc}} \left(T_0 - \frac{n_0 x}{v} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Отметим, что $\frac{\partial b(T_0, x)}{\partial x} = \frac{\alpha_1^2 C_{01} e^{-\alpha_1 \frac{x}{v}}}{v \rho_{oc}} \left(T_0 - \frac{n_0 x}{v} \right) > 0$ для любого $x \in [0; L]$.

Это значит, что максимальная удельная загрязненность будет на конце участка, т. е. при $x = L$, а именно

$$b(T_0, L) = b_0 - \left[n_0 \left(1 - e^{-\alpha_1 T_0} \right) + \alpha_1 e^{-\alpha_1 T_0} (1 - n_0) T_0 \right] \frac{C_{01}}{\rho_{oc}}. \quad (16)$$

Второй ход (нисходящее движение) и последующие ходы

После продавливания раствора реагента в первом ходе на всю длину L этот же раствор с той же скоростью продавливается в обратном направлении. Это называем вторым ходом.

Для описания процесса выбираем схему, как указано на рис. 1б. В результате можно использовать те же уравнения (4), (5), как и для первого хода, только изменив начальные и граничные условия (6), (7). Так как согласно (13) при $t \geq T_0$ и любом $x \in [0; L]$ $\tilde{C}(t, x) = C_{01}e^{-\alpha_1 T_0}$, то имеет смысл условия (6), (7) изменить следующим образом:

$$\tilde{C}(0, x) = \tilde{C}(t, 0) = C_{01}e^{-\alpha_1 T_0}, \quad b(0, x) = b_2, \quad (17)$$

где b_2 – определяется по формуле (16).

Так как среднее значение b_c изменится, следует пересчитать для второго цикла α_{2i} . Пересчитанное значение обозначим α_2 . Вышесказанное позволяет нам написать формулу для максимальной удельной загрязненности (которая, напомним, будет иметь место на конце участка, т. е. при $x = L$)

$$b(T_0, L) = b_2 - \left[n_0 \left(1 - e^{-\alpha_2 T_0} \right) + \alpha_2 e^{-\alpha_2 T_0} (1 - n_0) T_0 \right] \frac{C_{01} e^{-\alpha_1 T_0}}{\rho_{oc}}. \quad (18)$$

Рассуждая аналогичным образом, можно получить формулу для максимальной удельной загрязненности после проведения k ходов реагента

$$b(T_0, L) = b_0 - \sum_{m=1}^k \left[n_0 \left(1 - e^{-\alpha_m T_0} \right) + \alpha_m e^{-\alpha_m T_0} (1 - n_0) T_0 \right] J_m, \quad (19)$$

где $J_1 = C_{01}$, остальные J_m определяются рекуррентной формулой

$$J_m = J_{m-1} e^{-\alpha_{m-1} T_0}. \quad (20)$$

Выражение (19) показывает, что с ростом количества ходов уменьшения удельной загрязненности практически не происходит, т. е. необходима замена рабочего раствора на новый.

По полученным формулам была составлена компьютерная программа, позволяющая рассчитать количество циклов работы устройства, продолжительность очистки и степень удаления кольматанта на каждом этапе работы.

Пример

Рассмотрим работу установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров с использованием двух различных реагентов: соляной кислоты и дитионита натрия.

Исходные данные: диаметр фильтра $D_\phi = 273$ мм; диаметр камеры $D_{\text{кам}} = 219$ мм; толщина гравийной обсыпки $\delta = 89$ мм; удельный объем отложений кольматанта $b_0 = 0,1$; начальная пористость среды $n_0 = 0,3$; насыщенность порового пространства осадком $\chi = b_0/n_0 = 0,1/0,3 = 0,33$; плотность кольматанта $\rho_k = 2250$ кг/м³; длина обрабатываемого участка фильтра $L = 0,4$ м.

Кольматант представляет собой многокомпонентную систему, включающую соли кальция, магния, марганца (карбонаты), соединения железа в виде гидроксида, оксида, сульфида, фосфата [12]. Но так как в составе кольматанта преобладают соединения железа, далее для упрощения расчетов будем принимать, что кольматант состоит из $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Масса кольматанта M_k может быть определена по степени насыщенности порового пространства кольматирующими образованиями α в объеме пор гравийной обсыпки $W_{\text{пор}}$ по формуле

$$M_k = \chi \rho_k W_{\text{пор}} = \chi \rho_k \pi (R_r^2 - r_{\text{ф}}^2) L_{\text{ф}} n_0, \quad (21)$$

где ρ_k – плотность твердых частиц скелета осадка, изменяется от 1,7 до 3,1 г/см³; R_r – радиус гравийной обсыпки; $r_{\text{ф}}$ – радиус фильтра; $L_{\text{ф}}$ – длина фильтра; n_0 – начальная пористость гравийной обсыпки; χ – насыщенность порового пространства.

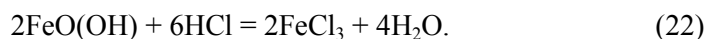
Подставив исходные данные, получим

$$M_k = 0,33 \cdot 2250 \cdot 3,14 \cdot (0,225^2 - 0,136^2) \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 9 \text{ кг.}$$

Регенерация с использованием соляной кислоты

Произведем теоретический расчет затрат соляной кислоты 100%-й концентрации на растворение кольматанта известного химического состава. Введем обозначение $M.B.$ – молекулярный вес.

Реакция растворения железистых соединений с соляной кислотой происходит по уравнению



Согласно (22) и ранее определенному значению M_k , находим требуемое количество соляной кислоты из следующего выражения:

$$m_{\text{HCl}} = \frac{M_k \cdot M.B._{\text{HCl}}}{M.B._{\text{FeO}(\text{OH})}}. \quad (23)$$

Молекулярный вес соединений:

$$M.B._{\text{FeO}(\text{OH})} = 55,8 + 16 \cdot 2 + 1 = 89 \text{ г/моль};$$

$$M.B._{\text{HCl}} = 1 + 35,5 = 36,5 \text{ г/моль};$$

$$M.B._{\text{FeCl}_3} = 55,8 + 35,5 \cdot 3 = 162,3 \text{ г/моль}.$$

Тогда

$$m_{\text{HCl}} = \frac{9 \cdot 0,219}{0,178} = 11,07 \text{ кг.}$$

Исследования [12] показали, что при 20%-й концентрации раствора соляной кислоты происходит наиболее эффективное растворение кольматанта в прифильтровой зоне. Определяем объем 20%-й соляной кислоты HCl

$$V_{\text{HCl}20\%} = \frac{m_{\text{HCl}}}{\rho_{\text{HCl}} C_{20\%}}, \quad (24)$$

где ρ_{HCl} – плотность соляной кислоты; $C_{20\%}$ – массовая концентрация соляной кислоты.

Подставив числовые значения, получим

$$V_{\text{HCl}20\%} = \frac{11,07}{1,098 \cdot 0,2} = 50,5 \text{ дм}^3.$$

Объем раствора соляной кислоты 20%-й концентрации, помещающегося в скважину длиной 0,4 м, $V_{\text{р-ра}} = 31 \text{ дм}^3$.

Из полученных данных видно, что для растворения 9 кг кольматанта, который содержится в гравийной обсыпке скважины длиной 0,4 м, необходимо 11,07 кг соляной кислоты 100%-й концентрации или 50,5 дм³ 20%-й соляной кислоты. Но в скважину с помощью устройства из-за геометрических размеров можно залить только 31 дм³ 20%-й соляной кислоты. Следовательно, будет необходима доливка реагента при работе устройства.

Для расчета по предложенной программе необходимо задать предельную концентрацию FeCl_3 , которая будет в растворе при взаимодействии соляной кислоты 20%-й концентрации и кольматанта.

Согласно (22) и ранее определенному значению $M_{\text{к}}$, находим массу хлорида железа m_{FeCl_3} из следующего выражения:

$$m_{\text{FeCl}_3} = \frac{m_{\text{HCl}} \cdot M_{\text{в}} \cdot \text{FeCl}_3}{M_{\text{в}} \cdot \text{HCl}} = \frac{11,07 \cdot 0,3246}{0,219} = 16,4 \text{ кг}. \quad (25)$$

Максимальная концентрация хлорида железа определяется по формуле

$$C_{m_{\text{FeCl}_3}} = \frac{m_{\text{FeCl}_3}}{V_{\text{р-ра}}} = \frac{16,4}{31} = 0,529 \text{ кг/дм}^3. \quad (26)$$

В программу занесены следующие исходные данные:

- начальная пористость среды $n_0 = 0,3$;
- удельный объем отложений $b_0 = 0,1$;
- плотность кольматанта $\rho_{\text{к}} = 2250 \text{ кг/м}^3$;
- длина обрабатываемого участка фильтра $L = 0,4 \text{ м}$;
- диаметр зерен гравийной загрузки $d_0 = 1 \text{ мм}$;
- максимальная концентрация хлорида железа в данном объеме реагента $C_{m_{\text{FeCl}_3}} = 529 \text{ кг/м}^3$;
- скорость движения реагента в закольматированной загрузке $v = 2 \text{ см/с}$.

Результаты расчетов:

- время прохода реагентом участка длиной 0,4 м $T_0 = 20 \text{ с}$;
- продолжительность промывки участка длиной 0,4 м $T_{\text{общ}} = 80 \text{ с}$.

Значения удельного объема кольматанта в гравийной обсыпке с использованием соляной кислоты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения удельного объема отложений кольматанта в гравийной обсыпке на каждом цикле регенерации с использованием соляной кислоты
The values of the specific volume of the mudding element deposits in the gravel package at each cycle of regeneration using hydrochloric acid

Первая заливка реагента		Вторая заливка реагента	
Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла b	Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла
1	0,014280	1	$\approx 0,01$
2	0,011582		
3	0,011464		

Проверка полученных данных

Первоначально удельный объем отложений составлял $b_0 = 0,1$. После заливки реагента и четырех циклов движения реагента в гравийной закольматированной загрузке удельный объем отложений составил $b = 0,01$.

Масса оставшегося кольматанта рассчитывается по формуле (21) с учетом изменения удельного объема отложений

$$M_{\text{к.ост}} = 0,033 \cdot 2250 \cdot 3,14 \cdot (0,225^2 - 0,136^2) \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 0,89 \text{ кг.}$$

Следовательно, масса удаленного кольматанта $M_{\text{к.у}}$ вычисляется по формуле

$$M_{\text{к.у}} = M_{\text{к}} - M_{\text{к.ост}} = 9 - 0,89 = 8,11 \text{ кг.} \quad (27)$$

После четырех циклов движения в закольматированной загрузке концентрация раствора соляной кислоты с 20 % становится 1,9 %.

Регенерация с использованием дитионита натрия

Произведем теоретический расчет затрат дитионита натрия 100%-й концентрации на растворение кольматанта известного химического состава.

Реакция растворения железистых соединений с дитионитом натрия происходит по уравнению



Согласно (28) и ранее определенному значению $M_{\text{к}}$, находим требуемое количество дитионита натрия из следующего выражения:

$$m_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} = \frac{M_{\text{к}} \cdot \text{M.В.}_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}}{\text{M.В.}_{\text{Fe}(\text{OH})_3}}. \quad (29)$$

Молекулярный вес соединений:

$$\text{M.В.}_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = 55,8 + 16 \cdot 3 + 1 \cdot 3 = 106,8 \text{ г/моль};$$

$$\text{M.В.}_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} = 23 \cdot 2 + 32 \cdot 2 + 16 \cdot 4 = 174 \text{ г/моль};$$

$$\text{M.В.}_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = 55,8 \cdot 2 + 32 \cdot 3 + 16 \cdot 12 = 399,6 \text{ г/моль}.$$

Тогда

$$m_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} = \frac{9 \cdot 0,174}{0,2136} = 7,33 \text{ кг.}$$

Установлено, что оптимальным условием растворения железистого кольматанта является концентрация раствора дитионита натрия 6–8 % при температуре не выше 18 °С. Добавка 1 % триполифосфата натрия в раствор позволяет предупредить повторное осаждение гидроксида железа в процессе обработки [12].

Объем 7%-го раствора дитионита натрия, полученный из 7,33 кг дитионита натрия 100%-й концентрации, будет равен 104,7 л.

Из полученных данных видно, что для растворения 9 кг кольматанта, который содержится в гравийной обсыпке скважины длиной 0,4 м, так же как и в случае с соляной кислотой, необходима доливка реагента при работе устройства.

Для расчета по предложенной программе нужно задать предельную концентрацию $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, которая будет в растворе при взаимодействии дитионита натрия 7%-й концентрации и кольматанта.

Согласно (28) и ранее определенному значению $M_{\text{к}}$, находим массу сульфата железа

$$m_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = \frac{m_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \cdot M_{\text{В}} \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{M_{\text{В}} \cdot \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} = \frac{7,33 \cdot 0,3996}{0,174} = 16,834 \text{ кг.} \quad (30)$$

Максимальная концентрация сульфата железа составит

$$C_{m\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = \frac{m_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}}{V_{\text{р-ра}}} = \frac{16,834}{31} = 0,543 \text{ кг/дм}^3. \quad (31)$$

В программу заносим следующие исходные данные:

- начальная пористость среды $n_0 = 0,3$;
- удельный объем отложений $b_0 = 0,1$;
- плотность кольматанта $\rho_{\text{к}} = 2250 \text{ кг/м}^3$;
- длина обрабатываемого участка фильтра $L = 0,4 \text{ м}$;
- диаметр зерен гравийной загрузки $d_0 = 1 \text{ мм}$;
- максимальная концентрация хлорида железа в данном объеме реагента $C_{m\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = 543 \text{ кг/м}^3$;
- скорость движения реагента в закольматированной загрузке $v = 2 \text{ см/с}$.

Результаты расчетов:

- время прохода реагентом участка длиной 0,4 м $T_0 = 20 \text{ с}$;
- продолжительность промывки участка длиной 0,4 м $T_{\text{общ}} = 80 \text{ с}$.

Значения удельного объема кольматанта в гравийной обсыпке с использованием дитионита натрия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения удельного объема отложений кольматанта в гравийной обсыпке на каждом цикле регенерации с использованием дитионита натрия
The values of the specific volume of the mudding element deposits in the gravel package at each cycle of regeneration using sodium dithionite

Первая заливка реагента		Вторая заливка реагента	
Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла b	Номер цикла	Удельный объем отложений в конце цикла
1	0,012011	1	$\approx 0,0091$
2	0,009239		
3	0,009116		

Проверка полученных данных

Первоначально удельный объем отложений составлял $b_0 = 0,1$. После заливки реагента и четырех циклов движения реагента в гравийной закольматированной загрузке удельный объем отложений составил $b = 0,0091$.

Масса оставшегося кольматанта рассчитывается по формуле (21) с учетом изменения удельного объема отложений

$$M_{\text{к.ост}} = 0,03 \cdot 2250 \cdot 3,14 \cdot (0,225^2 - 0,136^2) \cdot 0,4 \cdot 0,3 = 0,817 \text{ кг.}$$

Следовательно, масса удаленного кольматанта вычисляется по формуле

$$M_{\text{к.у}} = M_{\text{к}} - M_{\text{к.ост}} = 9 - 0,817 = 8,183 \text{ кг.} \quad (32)$$

Концентрация 7%-го раствора дитионита натрия после четырех циклов движения в закольматированной загрузке становится 0,63 %.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета продолжительности работы установки для реверсивно-реагентной обработки фильтров, по истечении которой удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня.

2. Для описания процесса растворения отложений способом реверсивно-реагентной регенерации скважин использована система уравнений: объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики. Путем интегрирования уравнения кинетики выведена аналитическая зависимость для расчета продолжительности регенерации слоя гравийной обсыпки. Полученная формула позволяет рассчитать время, по истечении которого удельный объем кольматирующих отложений в гравийной обсыпке будет снижен до заданного уровня. Рассмотрен пример расчета продолжительности реагентной обработки участка фильтра при использовании соляной кислоты и дитионита натрия в качестве реагентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Houben, G. Regenerierung und Sanierung von Brunnen / G. Houben, C. Treskatis. Munchen: Oldenbourgindustriever, 2003. 280 p.
2. Brunnenregenerierung mit dem WellReg Verfahren [Electronic resource] / GmbH "Aquaplus Brunnensanierung". 2007. Mode of access: <http://www.brunnenservice.de/dienst/reg.html>. Date of access: 01.06.2007.
3. Тесля, В. Г. Технология циркуляционной регенерации скважин / В. Г. Тесля // Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников: сб. науч. тр. МДНТП имени Ф. Э. Дзержинского. М., 1985. Вып. 74. С. 114–121.

4. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е, перераб. и доп. изд. М.: Недра, 1985. 345 с.
5. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ / Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. М.: Химия, 1977. 272 с.
6. Аксельруд, Г. А. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость / Г. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. Л.: Химия, 1974. 256 с.
7. Ивашечкин, В. В. Моделирование процесса реагентной регенерации скважин, оборудованных затрубными системами промывки / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко, В. В. Веремениук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 6. С. 80–87.
8. Иванова, И. Е. Установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин // Мелиорация. 2016. Т. 77, № 3. С. 26–31.
9. Алексеев, В. С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах / В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, Б. С. Шержуков // Итоги науки и техники. Гидрогеология и инженерная геология. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 11: Массоперенос в водонасыщенных горных породах. 144 с.
10. Веригин, Н. Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах / Н.Н. Веригин // Растворение и выщелачивание горных пород: труды Первого совещания по вопросам выщелачивания водорастворимых горных пород. М.: Госстройиздат, 1957. С. 84–113.
11. Минц, Д. М. Гидравлика зернистых материалов / Д. М. Минц, С. А. Шуберт. М.: Изд-во М-ва коммун. хозяйства РСФСР, 1955. 111 с.
12. Алексеев, В. С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В. С. Алексеев, В. Т. Гребенников. М.: Агропромиздат, 1987. 239 с.

Поступила 22.06.2017 Подписана в печать 25.08.2017 Опубликовано онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Houben G., Treskatis C. (2003) *Regenerierung und Sanierung von Brunnen*. Munchen, Oldenbourgindustriever. 280 (in German).
2. Brunnenregenerierung mit dem WellReg Verfahren. *Aquaplus Brunnensanierung*. 2007. Accessed: <http://www.brunnenservice.de/dienst/reg.html>. (Accessed: 1 Yune 2007) (in German).
3. Teslya V. G. (1985) The Technology of Recirculating of Wells Regeneration. *Sb. Nauch. Tr. MDNTP imeni F. Je. Dzerzhinskogo "Povyshenie Jefferektivnosti Raboty Vodozaborov iz Poverhnostnyh i Podzemnyh Istochnikov"* [Collected Works of the Moscow House of Scientific-and-Technical Publicizing named after F. E. Dzerzhinsky "Improving the Efficiency of Water Intakes from Surface and Underground Sources"]. Moscow, 74, 114–121 (in Russian).
4. Gavrilko V. M., Alekseev V. S. (1985) *Filters for Drilling Wells*. 3rd ed. Moscow, Nedra Publ., 345 (in Russian).
5. Akselrud G. A., Molchanov A. D. (1977) *Dissolution of Solid Substances*. Moscow, Khimiya Publ. 272 (in Russian).
6. Akselrud G. A., Lysyanskii V. M. (1974) Extraction. *The Solid – Liquid System*. Leningrad, Khimiya Publ. 256 (in Russian).
7. Ivashchekin V. V., Avtushko P. A., Veremenyuk V. V. (2013) Modeling the Process of Chemical Regeneration of Wells Equipped with Annular Wash Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 80–87 (in Russian).
8. Ivanova I. Ye., Ivashchekin V. V. (2016) Installation for Reverse-Chemical Regeneration of Water Wells. *Melioratsiya* [Land Reclamation], 77 (3), 26–31 (in Russian).
9. Alekseev V. S., Kommunar G. M., Sherzhukov B. S. (1989) Mass Transfer in Water-Saturated Rocks. *Itoги Nauki i Tekhniki. Gidrogeologiya i Inzhenernaya Geologiya. T. 11: Massopere-nos v Vodonasyshchennykh Gornnykh Porodakh* [The Summaries of Science and Technology. Hydrogeology and Engineering Geology. Vol. 11. Mass Transfer in Water-Saturated Rocks]. Moscow, VINITI. 144 (in Russian).
10. Verigin N. N. (1957) On Kinetics of Dissolution of Salts in Water Filtration into Soils. *Dissolution and Leaching of Rocks. Proceedings of the First Meeting on Leaching of Water-Soluble Rocks*. Moscow, Gosstroizdat Publ., 84–113 (in Russian).
11. Mints D. M., Shubert S. A. (1955) *Hydraulics of Granular Materials*. Moscow, Ministry of Utilities of RSFSR. 111 (in Russian).
12. Alekseev V. S., Grebennikov V. T. (1987) *Restoring the Output of Water Wells*. Moscow, Agropromizdat Publ. 239 (in Russian).

Received: 22 June 2017

Accepted: 25 August 2017

Published online: 29 January 2018