

УСТАНОВКА ДЛЯ РЕВЕРСИВНО-РЕАГЕНТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

И. Е. Иванова, аспирант

В.В. Ивашечкин, доктор технических наук, доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

Аннотация

В статье описана установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин. Разработана методика расчета параметров компрессора, входящего в состав установки. Предложены рекомендации по назначению количества реагента, закачиваемого в скважину, и времени регенерации.

Ключевые слова: водозаборная скважина, реверсивно-реагентная регенерация, компрессор, кольматант, реагент

Abstract

I.E. Ivanova, V.V. Ivashchkin

INSTALLATION FOR REVERSE REAGENT REGENERATION OF WATER WELLS

The article describes installation for reverse reagent of water wells. Calculation mode is defined for compressor settings included in installation. Some recommendations are given concerning amount of reagent pumping in water well and regeneration time.

Keywords: water well, reverse reagent regeneration, compressor, mudding element, reagent

Введение

В связи с постоянным ухудшением качества поверхностных вод, вызванных увеличивающимися выбросами отходов существующих и вновь построенных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, с каждым годом увеличивается забор воды из подземных источников водоснабжения. Высокие эксплуатационные расходы и стоимость строительства водозаборных скважин, их сравнительно низкий срок службы, делает актуальным создание новых технологий для увеличения долговечности скважин. 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 интереса циркуляционные методы регенерации [1-3], в которых химическое растворение отложений происходит более интенсивно, нежели в режиме «реагентной ванны» и «циклического задавливания» реагента, где реагент неравномерно очищает фильтр из-за утечек в пласт через наиболее проницаемые участки [4]. Циркуляционные же методы воздействуют на ограниченный участок фильтра,

что позволяет точно определить место и с минимальными утечками реагента в пласт промывать прифильтровую зону. Однако в состав циркуляционного скважинного устройства, предназначенного для закачки-откачки реагента в интервале фильтра, входит погружной циркуляционный насос с электродвигателем, перекачивающий агрессивную среду, находясь в ней. Из-за сложности и уникальности технологического оборудования эта технология не получила распространения. Поэтому разработка эффективных и достаточно простых в эксплуатации реагентных технологий для регенерации водозаборных скважин является актуальной задачей.

В БНТУ предложена установка для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин, состоящая из компрессора, шлангов и погружного устройства, выполненного в виде двухкамерного пневматического насоса вытеснения [5]. Преимуществом установки является отсутствие в ее составе циркуляционного насоса и возможность эффективной обработки ограниченного интервала фильтра. Скважинное погружное устройство не содержит движущихся частей за исключением 2-х плавающих обратных клапанов.

Однако отсутствие методики расчета оптимальных геометрических размеров погружного устройства и подбора параметров технологического оборудования установки сдерживает ее внедрение в производство. Поэтому цель работы – разработка

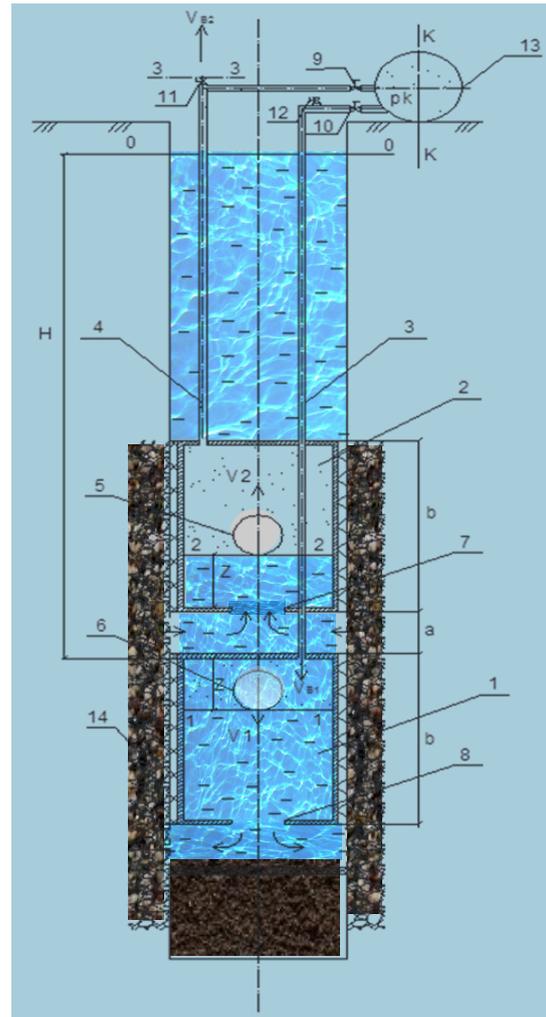
методик расчета параметров погружного устройства и технологического оборудования при регенерации скважины с помощью установки для реверсивно-реагентной обработки скважин.

Основная часть

Рабочий процесс регенерации осуществляют в следующем порядке. Погружное устройство (рисунок 1) помещают в фильтр скважины и по шлангам 3 и 4 подают порции реагента из бака (на рисунке не показан) в камеры 1 и 2. Затем по шлангам 3 и 4 подают компрессором 13 в те же камеры 1 и 2 сжатый воздух и задавливают реагент в гравийную обсыпку. При этом плавающие шаровые клапаны 5, 6 перекрывают отверстия 7 и 8 в камерах 1 и 2 и не выпускают воздух в скважину. Реагент начинает растворять колюматирующие отложения в гравийной обсыпке в режиме «реагентной ванны». Затем готовят установку к работе в режиме «реверсивно-реагентной» обработки. Вначале сбрасывают, например, сжатый воздух из нижней камеры 1 в атмосферу через открытый вентиль 12 при закрытом вентиле 10. При этом реагент под действием разрежения в камере 1 всасывается из гравийной обсыпки и заполняет камеру 1 через отверстие 8. Установка готова. После этого закрывают сбросной вентиль 12, открывают вентиль 10 и подают сжатый воздух из ресивера компрессора 13 по шлангу 3 в нижнюю камеру 1. Одновременно, при закрытом вентиле 9 на шланге 4 открывают сбросной вентиль 11 и сбрасывают через него сжатый воздух из верхней камеры 2 в атмосферу. Это позволяет вести задавливание реагента из нижней камеры 1 с избыточным давлением через прифильтровую зону, заполненную гравийной обсыпкой в направлении верхней камеры 2, в которой искусственно создается пониженное давление. Реагент, поднимаясь вверх по гравийной обсыпке, омывает ее зерна и существенно интенсифицирует процесс растворения отложений. В конце процесса задавливания реагента плавающий шаровой клапан 6 перекрывает отверстие 8 в камере 1 и не выпускает воздух в скважину. Затем перекрывают сбросной вентиль 11, открывают вентиль 9 и подают сжатый воздух по шлангу 4 в верхнюю камеру 2. Одновременно сбрасывают сжатый воздух из нижней камеры 1 по шлангу 3 через открытый сбросной вентиль 12 в атмосферу при закрытом вентиле 10.

Реагент под действием перепада давлений между верхней камерой 2 и нижней 1 проходит через

прифильтровую зону, заполненную обсыпкой, сверху вниз и заполняет нижнюю камеру 1. Далее цикл закачки и откачки воздуха в камерах 1 и 2 многократно повторяют до полного растворения колюматанта в гравийной обсыпке. Процесс знакопеременного (реверсивного) движения реагента в грунте обсыпки значительно интенсифицирует растворение отложений и является более эффективным, чем «реагентная ванна», где реагент оставляют обычно на 24 часа в фильтре скважины.



1,2 – нижняя и верхняя камеры; 3,4 – воздуховоды; 5,6 – плавающие шаровые клапаны; 7,8 – отверстия в камерах; 9, 10 – вентили; 11,12 – сбросные вентили; 13 – компрессор; 14 – гравийная обсыпка

Рисунок 1 – Схема установки для реверсивно-реагентной регенерации скважин

Рабочей средой, осуществляющей реверсивное движение реагента в камерах погружного устройства, стволе скважине и прифильтровой зоне, является сжатый воздух, подаваемый из ресивера компрессора. Давление и расход сжатого воздуха будет зависеть от глубины скважины и геометрических раз-

меров фильтра скважины, фильтрационных параметров гравийной обсыпки, геометрических размеров погружного устройства, величины задаваемой скорости фильтрации в гравийной обсыпке. Для установления этой взаимосвязи разобьем весь путь движения сжатого воздуха и реагента на три участка, лежащих между сечениями К-К, 1-1, 2-2 и 3-3 (рисунок 1). Движение считаем установившимся.

Необходимое давление компрессора находим из уравнения Д. Бернулли, записанного для сечений К-К и 1-1:

$$\rho_k = \rho_{ж}g(H+Z) + \rho_1 + \rho_{возд1}g(h_{тр.возд1} + h_{вход}), \quad (1)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность реагента в водозаборной скважине, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{возд1}$ – плотность воздуха в воздуховоде, кг/м³; H – расстояние от сечения 1-1 до сечения 0-0, м; Z – высота слоя реагента в нижней камере, м; ρ_1 – давление в сечении 1-1, Па; $h_{тр.возд1}$ – потери напора в воздуховоде, м; $h_{вход}$ – потери напора на входе воздуха в камеру, м.

Плотность воздуха в воздуховоде $\rho_{возд1}$ находится по формуле [6]:

$$\rho_{возд1} = \frac{\rho_{возд}}{RT} = \frac{\rho_{ж}g(H+b)}{RT}, \quad (2)$$

где $\rho_{возд}$ – среднее давление воздуха, Па; R – удельная газовая постоянная, для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К); T – температура, К; b – длина камеры, м.

Потери напора в воздуховоде $h_{тр.возд1}$ находятся по формуле [6]:

$$h_{тр.возд1} = \lambda_{возд} \frac{l_{возд1} v_{возд1}^2}{d_{возд} 2g}, \quad (3)$$

где $\lambda_{возд}$ – коэффициент сопротивления по длине, определяется по формуле Ф.А. Шевелева

$$\lambda_{возд} = \frac{0,021}{d_{возд}^{0,3}},$$

$l_{возд1}$ – длина воздуховода 1, м (рисунок 1, позиция 3); $v_{возд1}$ – средняя скорость движения воздуха в воздуховоде 1, м/с; $d_{возд}$ – диаметр воздухопроводов, м.

Средняя скорость движения воздуха в воздуховоде 1 $v_{возд1}$ зависит от расхода Q , подаваемого компрессором, и находится из уравнения неразрывности:

$$Q = v_{возд1} \omega_{возд} = v_{гр.обс} \omega_{гр.обс}, \quad (4)$$

$$v_{возд1} = \frac{v_{гр.обс} \omega_{гр.обс}}{\omega_{возд}}, \quad (5)$$

где $v_{гр.обс}$ – средняя скорость движения реагента в поперечном сечении гравийной обсыпки, принимается в пределах 2-3 см/с; $\omega_{возд}$ – площадь поперечного сечения воздуховода; $\omega_{гр.обс}$ – площадь поперечного сечения гравийной обсыпки.

Потери напора на входе в нижнюю камеру (рисунок 1, позиция 1) $h_{вход}$ находятся по формуле [6]:

$$h_{вход} = \zeta_{вход} \frac{v_{возд1}^2}{2g}, \quad (6)$$

где $\zeta_{вход}$ – коэффициент местного сопротивления, зависит от соотношения $\omega_{к}/\omega_{возд}$, где $\omega_{к}$ и $\omega_{возд}$ – площадь камеры и площадь воздуховода соответственно.

Давление p_1 находим из уравнения Д. Бернулли, записанного для сечений 1-1 и 2-2:

$$\rho_1 = \rho_{ж}g(a+2Z) + \rho_2 + \rho_{ж}g(h_{гр.обс} + h_{\phi1} + h_{\phi2} + h_{омв1} + h_{омв2}), \quad (7)$$

где a – расстояние между двумя камерами, м; ρ_2 – давление в сечении 2-2, Па; $h_{гр.обс}$ – потери напора реагента в гравийной обсыпке; $h_{\phi1}$, $h_{\phi2}$ – потери напора на первом и втором участках фильтра соответственно; $h_{омв1}$, $h_{омв2}$ – потери напора реагента после прохождения первого и второго отверстий в камерах 1 и 2 соответственно.

Потери напора реагента в гравийной обсыпке $h_{гр.обс}$ находим из закона Дарси для ламинарной фильтрации по формуле:

$$h_{гр.обс} = \frac{v_{гр.обс} b}{K_{ф.гр.обс}}, \quad (8)$$

где $K_{ф.гр.обс}$ – коэффициент фильтрации гравийной обсыпки.

Потери напора на первом и втором участках фильтра $h_{\phi1}$, $h_{\phi2}$ равны. Их можно приближенно определить по формуле:

$$h_{\phi1} = h_{\phi2} = \frac{v_{\phi} \delta}{K_{ф.ф}}, \quad (9)$$

где v_{ϕ} – средняя скорость движения реагента во время прохождения через фильтр; δ – толщина фильтра, $\delta = 20-30$ мм; $K_{ф.ф}$ – коэффициент фильтрации

каркасно-проволочного фильтра, с учетом его кольматации, принимается по данным [4, таблица 37].

Средняя скорость движения реагента во время прохождения через фильтр v_ϕ определяется по формуле:

$$v_\phi = \frac{Q}{\omega_\phi}, \quad (10)$$

где Q – расход реагента, проходящего через фильтр; ω_ϕ – площадь боковой поверхности участка фильтра, через который проходит реагент, $\omega_\phi = \pi D_\phi a$.

Потери напора реагента после прохождения первого и второго отверстий (рисунок 1 позиция 7, 8) в камерах $h_{отв1}$, $h_{отв2}$ определяются по формулам [7]:

$$h_{отв1} = \zeta_{отв} = \frac{v_{кам1}^2}{2g}, \quad (11)$$

$$h_{отв2} = \zeta_{отв} = \frac{v_{кам2}^2}{2g}, \quad (12)$$

где $\zeta_{отв}$ – коэффициент местного сопротивления зависит от соотношения ω_k/ω_0 , где ω_0 – площадь отверстия в камерах (рисунок 1, позиция 7, 8); $v_{кам1}$, $v_{кам2}$ – средняя скорость движения реагента в первой и второй камере соответственно.

Средняя скорость движения реагента в первой и второй камере $v_{кам1}$, $v_{кам2}$ зависит от расхода Q , подаваемого компрессором, и находится из уравнения неразрывности:

$$Q = v_{кам1} \omega_k = v_{кам2} \omega_k = v_{гр.обс} \omega_{гр.обс}, \quad (13)$$

$$v_{кам1} = v_{кам2} = \frac{v_{гр.обс} \omega_{гр.обс}}{\omega_k}, \quad (14)$$

Давление p_2 находим из уравнения Д. Бернулли, записанного для сечений 2-2 и 3-3:

$$p_2 = \rho_{возд2} g (h_{тр.возд2} + h_{выход}), \quad (15)$$

где $\rho_{возд2}$ – плотность воздуха в воздуховоде, определяется по формуле (2), $\rho_{возд2} \approx \rho_{возд1}$; $h_{тр.возд2}$ – потери напора в воздуховоде; $h_{выход}$ – потери напора на выходе воздуха из камер в воздуховод.

Потери напора в воздуховоде $h_{тр.возд2}$ находятся по формуле [6]:

$$h_{тр.возд2} = \lambda_{возд} \frac{l_{возд} v_{возд2}^2}{d_{возд} 2g}, \quad (16)$$

где $l_{возд2}$ – длина воздуховода 2 (рисунок 1, позиция 4); $v_{возд2}$ – средняя скорость движения воздуха в воздуховоде 2, определяем по формуле (5), $v_{возд2} \approx v_{возд1}$.

Потери напора на выходе воздуха из верхней камеры (рисунок 1, позиция 2) в воздуховод $h_{выход}$ находим по формуле:

$$h_{выход} = \zeta_{выход} \frac{v_{возд2}^2}{2g}, \quad (17)$$

где $\zeta_{выход}$ – коэффициент местного сопротивления, зависит от соотношения $\omega_k/\omega_{возд}$.

Подставляя выражение (7) и (15) в выражение (1), получаем выражение для расчета давления в ресивере компрессора:

$$\begin{aligned} \rho_k &= \rho_{жс} g (H + 3Z + a) + \\ &+ \rho_{жс} g (h_{гр.обс} + h_{\phi1} + h_{\phi2} + h_{отв1} + h_{отв2}) + \\ &+ \rho_{возд1} g (h_{тр.возд1} + h_{выход}) + \rho_{возд2} g (h_{тр.возд2} + h_{выход}) = \\ &= \rho_{жс} g (H + 3Z + a) + \Delta\rho_{тр.суст}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\Delta\rho$ – потери давления в системе.

По полученному выражению (18) строим характеристику трубопровода устройства в общем виде (рисунок 2).

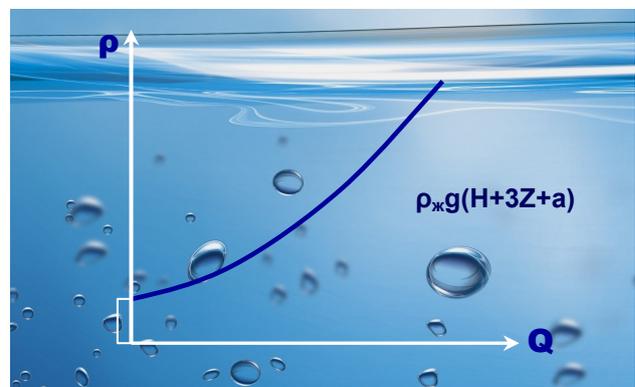


Рисунок 2 – Характеристика трубопровода устройства в общем виде

Пример. Рассмотрим регенерацию трех фильтров скважин диаметрами равными 168, 219 и 273 мм, $H=50$ м; расстояние между камерами a равно внутреннему диаметру фильтра D_ϕ ; длина камеры l равна $4 \cdot D_\phi$; толщина слоя гравийной обсыпки равна $0,525 \cdot D_{нар}$ ($D_{нар}$ – наружный диаметр фильтра); диаметры шлангов воздуховодов $d=0,02$ м; диапазон скоростей движения реагента в гравийной обсыпке – от 0,005 м/с до 0,05 м/с. По выражению

(18), задавая расход Q компрессора, строим характеристику трубопроводов устройства в координатах $Q - \rho$ (рисунок 3) и $v_{гр.обс} - \rho$ (рисунок 4).

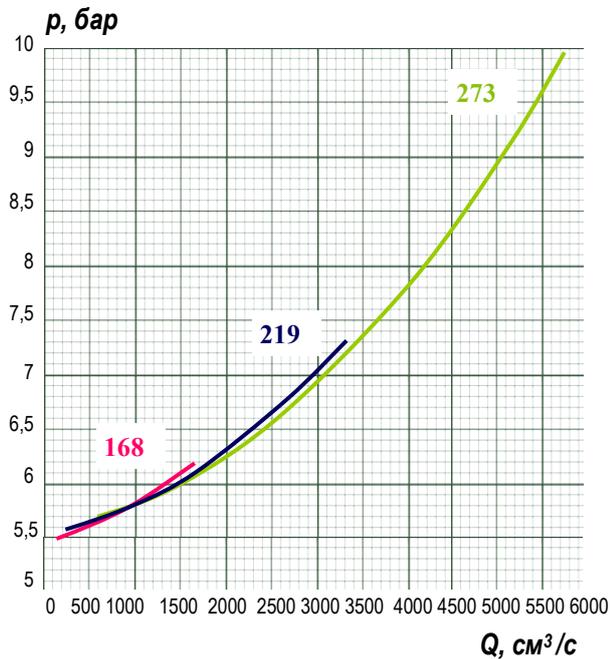
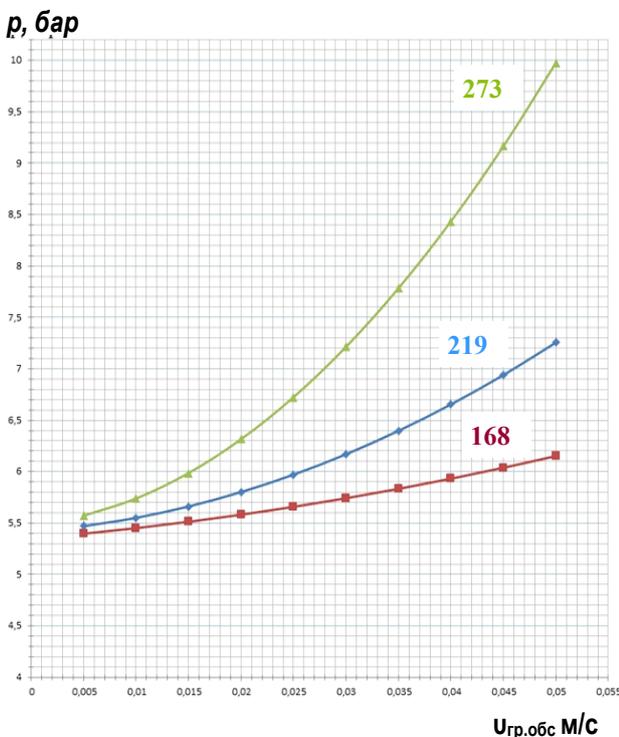


Рисунок 3 – Зависимость давления p в ресивере компрессора установки от его подачи Q при работе в фильтрах разных диаметрах: 168, 219 и 273 мм



4 – Зависимость давления p в ресивере компрессора установки от скорости $v_{гр.обс}$ движения реагента в гравийной обсыпке при работе в фильтрах разных диаметрах: 168, 219 и 273 мм

Задавая скорость движения реагента в гравийной обсыпке $v_{гр.обс}$, зная диаметр фильтра скважины, по графику (рисунок 4), определяем необходимое давление p компрессора и по формуле (13) – необходимую подачу компрессора Q . Подбираем марку компрессора для обработки данной скважины.

Опыт подбора реагентов показывает, что универсальным средством для растворения многокомпонентных кольматантов является соляная кислота. Ее количество, заливаемое в скважину, обычно оценивается по формуле [8]:

$$M_{HCL} = 1,2K_c M_k, \quad (19)$$

где 1,2 – коэффициент запаса, который предусматривает 20 % избыток реагента по отношению к расчетному, для создания необходимого pH в зоне реакции; M_{HCl} , M_k – массы соответственно соляной кислоты (в пересчете на хлористый водород 100 %-й концентрации) и кольматанта; K_c – коэффициент удельного расхода реагента.

Коэффициент удельного расхода реагента K_c характеризует собой удельные затраты реагента на растворение кольматанта единичной массы и представляет собой соотношение количеств, вступающих в реакцию кольматанта и реагента, его можно рассчитать по формуле:

$$K_c = \frac{m_{HCL}}{m_k}, \quad (20)$$

где m_{HCl} – масса хлористого водорода (100 % концентрации), необходимого для растворения кольматанта единичной массы m_k .

Коэффициент K_c , ввиду сложного состава кольматанта, определяют лабораторным путем по фактическому расходу реагента на растворение проб кольматирующих отложений, взятых из фильтра скважины.

Масса кольматанта M_k может быть определена по степени насыщенности порового пространства кольматирующими образованиями a в объеме пор гравийной обсыпки $W_{пор}$ по формуле [8]:

$$M_k = \alpha \rho W_{пор} = \alpha \rho_k \pi (R_r^2 - r_\phi^2) l_\phi n_0, \quad (21)$$

где ρ_k – плотность твердых частиц скелета осадка изменяется от 1,7 до 3,1 г/см³; R_r – радиус гравийной обсыпки; r_ϕ – радиус фильтра; l_ϕ – длина филь-

ра; n_0 – начальная пористость гравийной обсыпки, α – насыщенность порового пространства, которая определяется по формуле:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{k_1}{k_0} \right)^{1/3}, \quad (22)$$

где k_0 – первоначальный коэффициент фильтрации прифилтровой зоны; k_1 – коэффициент фильтрации прифилтровой зоны перед обработкой.

В исследованиях [8] определялось время полного выщелачивания, соответствующее стабилизации коэффициента фильтрации гравийной загрузки для соответствующей скорости. Была установлена зависимость продолжительности полного выщелачивания $t_{инт}$ интервала гравийной обсыпки от скорости фильтрации реагента в гравийной обсыпке $v_{гр.обс}$. В большей степени экспериментальным данным соответствовала логарифмическая регрессионная модель вида:

$$t_{инт} = A \ln(v_{гр.обс}) + B, \quad (23)$$

где A и B – коэффициенты, которые получают в лабораторных условиях для определённого реагента и состава кольматанта.

Задавая скорость движения реагента в гравийной обсыпке $v_{гр.обс}$, по формуле (23), определяют

время $t_{инт}$, необходимое для регенерации интервала фильтра скважины высотой $l_{инт} = (2a+b)$. Тогда общая продолжительность регенерации фильтра T_ϕ скважины длиной l_ϕ будет равна:

$$T_\phi = t_{инт} \frac{l_\phi}{l_{инт}} = t_{инт} \frac{l_\phi}{(2a+b)}. \quad (24)$$

Выводы

1. Предложена схема установки для реверсивно-реагентной регенерации водозаборных скважин с погружным устройством, выполненным на базе двухкамерного пневматического насоса вытеснения.

2. Разработана методика расчета параметров установки для реверсивно-реагентной регенерации скважин, по заданной скорости фильтрации потока реагента в гравийной обсыпке, учитывающая геометрические размеры скважины, установки для регенерации и степень кольматации фильтра и гравийной обсыпки.

3. Предложены рекомендации по назначению количества реагента, закачиваемого в скважину, и продолжительности обработки, необходимых для полного растворения кольматирующих отложений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Houben, G. Regenerierung und sanierung von Brunnen / G. Houben, C. Treskatis. – Munchen: Oldenbourgindustriever, 2003. – 280 s.
2. Brunnenregenerierung mit dem Well Reg Verfahren [Electronic resource]/ GmbH «Aquaplus Brunnen-sanierung». – 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 // Сб. науч. тр. / МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского. – М., 1985. – Вып. 74: Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников. – С. 114–121.
4. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин. / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. - Изд.3, перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 345 с.
5. Ивашечкин, В.В. Регенерация скважин методом реверсивного задавливания реагента пневматическими насосами вытеснения/ В.В. Ивашечкин, И.Е. Иванова, А.В. Ивашечкин // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Междунар. науч.-технич. конф.: в 4 т. / БНТУ. – Минск, 2015. – Т. 1.– С. 141.
6. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
7. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселев [и др.] ; под общ. ред. П.Г. Киселева. – 4-е изд. – М.: Энергия, 1972. – 312 с
8. Ивашечкин, В. В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения. / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, А. Н. Кондратович. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 86-87; 168-172.

Поступила 6.09.2016 г.