

УДК 628.112

**ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ,  
ОСНАЩЕННОЙ ЗАТРУБНОЙ СИСТЕМОЙ РЕАГЕНТНОЙ ПРОМЫВКИ**

**В.В.Ивашечкин**, кандидат технических наук

**П.А.Автушко**, инженер

Белорусский национальный технический университет

**Ключевые слова:** скважина, гравийная обсыпка, кольматация, реагент, регенерация, гидродинамическая сетка, циркуляция

**Введение**

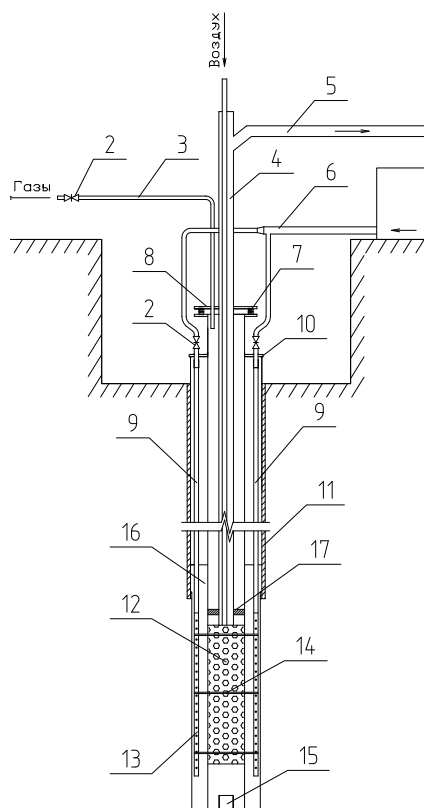
В настоящее время основным источником водоснабжения в Республике Беларусь являются подземные воды, для добычи которых используются водозаборные скважины различных конструкций.

Многолетний опыт эксплуатации скважинных водозаборов показал, что уже спустя 3-5 лет после начала работы, вследствие кольматации фильтра и прифильтровой зоны, дебит скважины падает примерно на 20% по сравнению с первоначальным. Для восстановления дебита применяют механические, импульсные и реагентные методы декольматации, которые осуществляют изнутри фильтра скважины. Однако основной объем кольматирующих отложений сосредоточен в гравийной обсыпке, которая отделена от внутренней полости фильтра толстостенным перфорированным каркасом с низкой скважностью (20-30%) и закольматированной водопримной поверхностью. Из-за низкой эффективности импульсного и реагентного воздействия на отложения, направленного изнутри фильтра, в прифильтровой зоне остается значительное количество отложений, которые, являясь центрами аккумуляции новообразований, постепенно увеличиваются в объеме и упрочняются. Пористость гравийной обсыпки, удельный дебит и эффективность ремонтных мероприятий резко снижаются.

Для увеличения эффективности восстановительных работ и увеличения долговечности скважин можно выделить два основных вида мероприятий: 1) совершенствование известных и создание новых методов декольматации; 2) создание новых конструкций ремонтпригодных скважин, которые позволят осуществлять декольматацию как изнутри фильтра, так и снаружи. Учитывая вышесказанное, следует считать второе направление исследования актуальным и перспективным.

**Технология циркуляционной регенерации и расчет гидродинамического поля фильтрации**

В БНТУ разработана новая конструкция долговечной скважины [1-3], которая обладает существенными преимуществами при проведении текущих ремонтов и реконст-



**Рис.1. Конструкция водозаборной скважины с элементами системы циркуляционной регенерации и извлечения фильтра и обвязкой для проведения регенерации.**

1 – напорный бак, 2 – вентиль, 3 – труба выпуска газа, 4 – эрлифт, 5 – входной шланг, 6 – выходной шланг, 7 – уплотнение, 8- герметичный оголовок, 9 – циркуляционные скважины, 10 – герметизирующая плита, 11 – затрубная цементация, 12 – фильтр скважины, 13 – фильтровая часть циркуляционных скважин, 14 – захватное приспособление, 15 – муфта, 16 – фильтрующая засыпка, 17 – пакер

рукции. Основным отличием новой скважины (см. рис.1) от известных конструкций является размещение в фильтрующей обсыпке специальных циркуляционных скважин из полиэтиленовых труб малого диаметра для обеспечения циркуляции реагента во всем объеме гравийной обсыпки.

Кроме того, в отстойнике предусматривается установка муфты для облегчения извлечения фильтра в случае необходимости. Конструкция скважины предполагает возможность воздействия на отложения как изнутри, так и снаружи водопримной поверхности, а также позволяет надежно и с

минимальными затратами осуществлять извлечение и замену фильтра.

Для проведения текущего ремонта предлагается использовать циркуляционно-реагентный метод с подачей реагента в закольматированную фильтрующую обсыпку по циркуляционным скважинам. Между фильтровой и надфильтровой зонами скважины для разрыва их гидравлической связи устанавливается пакер. Далее в нагнетательные скважины из напорного бака подается реагент, растворяющий кольматирующие отложения в порах фильтрующей обсыпки. Одновременно с помощью водоподъемного оборудования (например, эрлифта) из фильтровой зоны скважины реагент вместе с продуктами растворения выкачивается назад в бак, откуда снова подается в циркуляционные скважины, то есть обеспечивается принудительная циркуляция реагента. После того, как концентрация реагента достигает своего предельного значения, его заменяют на новый и продолжают циркуляционную обработку затрубного пространства. Для очистки внутренней поверхности фильтра и разрушения кольматанта перед началом таких работ целесообразно применение импульсного метода.

Рассмотрим гидродинамику движения фильтрационного потока жидкости от нескольких циркуляционных скважин, работающих в режиме нагнетательных, расположенных в вершинах правильного многоугольника, к одной откачной (водозаборной) скважины

не, находящейся в центре многоугольника.

Пусть водозаборная скважина вскрывает напорный водоносный горизонт и применяемый для ее реагентной регенерации раствор незначительно отличается по физическим свойствам от подземных вод. В момент времени  $t = 0$  начинается откачка из водозаборной скважины с расходом  $Q$ , с того же момента времени в каждую из  $n$  нагнетательных скважин начинает поступать расход раствора  $Q/n$ . В части пласта, примыкающего к водозаборной скважине, формируется депрессия, а у нагнетательных скважин – репрессия. Для напорного пласта установившийся режим фильтрации наступает практически мгновенно.

С целью проектирования системы расположения циркуляционных скважин и распределения необходимых расходов закачки и откачки необходимо решить следующие основные задачи: 1) рассчитать гидродинамическое поле фильтрации, которое позволит определить напор в любой точке поля и в скважинах, а также направление и скорость фильтрации раствора в любой точке поля и по различным линиям тока; 2) рассчитать время контакта раствора с кольматантом по различным линиям тока. Применительно к целям геотехнологических методов добычи полезных ископаемых такая задача частично рассматривалась в работе [4].

Для простейшей лучевой схемы взаимодействия скважин при циркуляционной регенерации, представленной на рис.1, можно использовать общее уравнение для расчета изменения уровня в любой точке прифильтровой зоны после установления квазиустановившегося движения [4]:

$$s = \frac{Q}{4\rho km} \left( \ln \frac{2,25 at}{r^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{2,25 at}{c_i^2} \right) \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от водозаборной скважины радиусом  $r_c$  до точки, в которой определяется понижение;  $\rho_i$  – расстояние от  $i$ -ной нагнетательной скважины до точки, в которой определяется понижение;  $n$  – число нагнетательных скважин;  $k$  – коэффициент фильтрации прифильтровой зоны;  $m$  – мощность пласта;  $t$  – время от начала работы системы;  $a$  – коэффициент пьезопроводности.

Окончательно уравнение имеет вид

$$s = \frac{Q}{4\rho km} \left( -\ln r^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln c_i^2 \right) \quad (2)$$

Для построения гидродинамической сетки необходимо в выражении (2) перейти от полярных координат к прямоугольным координатам, расположив начало в центре водозаборной скважины, а ось абсцисс, проходящей через  $n$ -ную нагнетательную скважину. Тогда имеем следующие соотношения [4]:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad \rho_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2; \quad y_i = R \sin \alpha; \quad x_i = R \cos \alpha; \quad \alpha = \frac{2\pi}{n} i \quad (3)$$

где  $x, y$  – координаты точки, в которой определяется изменение уровня;  $x_i, y_i$  – координаты нагнетательных скважин;  $\alpha_i$  – угол между лучом, проходящим из начала координат

через нагнетательную скважину с номером  $i$ , и осью абсцисс;  $R$  – расстояние от нагнетательной до водозаборной скважины.

С учетом выражений (3) уравнение (2) имеет вид

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ -\ln(x^2 + y^2) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \ln \left[ \left( x - R \cos \frac{2\pi i}{n} \right)^2 + \left( y - R \sin \frac{2\pi i}{n} \right)^2 \right] \right\} \right\} \quad (4)$$

При  $r = r_c$  и  $\rho_i = R$ , где  $R$  – расстояние между водозаборной и нагнетательными скважинами, выражение (2) принимает вид формулы Дююи, по которой можно найти понижение в водозаборной скважине:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{R}{r_c} \quad (5)$$

Отсюда можно решить обратную задачу – найти расход  $Q$  откачки при заданном понижении  $S$  откачной скважине

$$Q = \frac{4\pi kmS}{\ln \frac{R}{r_c}} \quad (6)$$

Построим гидродинамическую сетку для водозаборной скважины, оборудованной затрубной системой циркуляционной регенерации, состоящей из четырех скважин при следующих исходных данных: нагнетательные скважины располагаются на расстоянии  $R = 0,5$  м от откачной, проницаемость пласта –  $km = 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с, расход жидкости, откачиваемый из водозаборной скважины,  $Q = 0,006$  м<sup>3</sup>/с = 21,6 м<sup>3</sup>/ч.

Для построения гидродинамической сетки воспользуемся уравнением (4). Расчет удобно выполнять в форме таблицы с использованием ЭВМ. Задавая координаты  $x$  и  $y$ , подставив исходные данные в уравнение (4), определяем изменение напора  $S$  в данной точке. На рис. 2 и 3 показаны соответственно гидродинамическая сетка фильтрации и пьезометрическая линия по профилю  $Ox$ .

Цифры на линиях равных напоров гидродинамической сетки соответствуют значениям пьезометрических напоров, цифры на линиях тока – значения функции тока в долях от расхода закачной скважины. Так как нагнетательные скважины располагаются симметрично относительно водозаборной, гидродинамическая сетка также симметрична.

Анализ гидродинамической сетки показывает, что на периферийных участках зоны кольматации ширина поясов сетки, кривизна и длина линий тока, выходящих из нагнетательных скважин, наибольшая. Это указывает на то, что скорость вдоль этих линий меньше, чем по главной линии тока (кратчайшей линии, соединяющей нагнетательную и водозаборную скважины). Поэтому периферийные сегменты зоны кольматации, лежащие между нагнетательными скважинами, будут выщелачиваться медленнее, чем участки, лежащие между водозаборной и нагнетательными скважинами, так как скорость

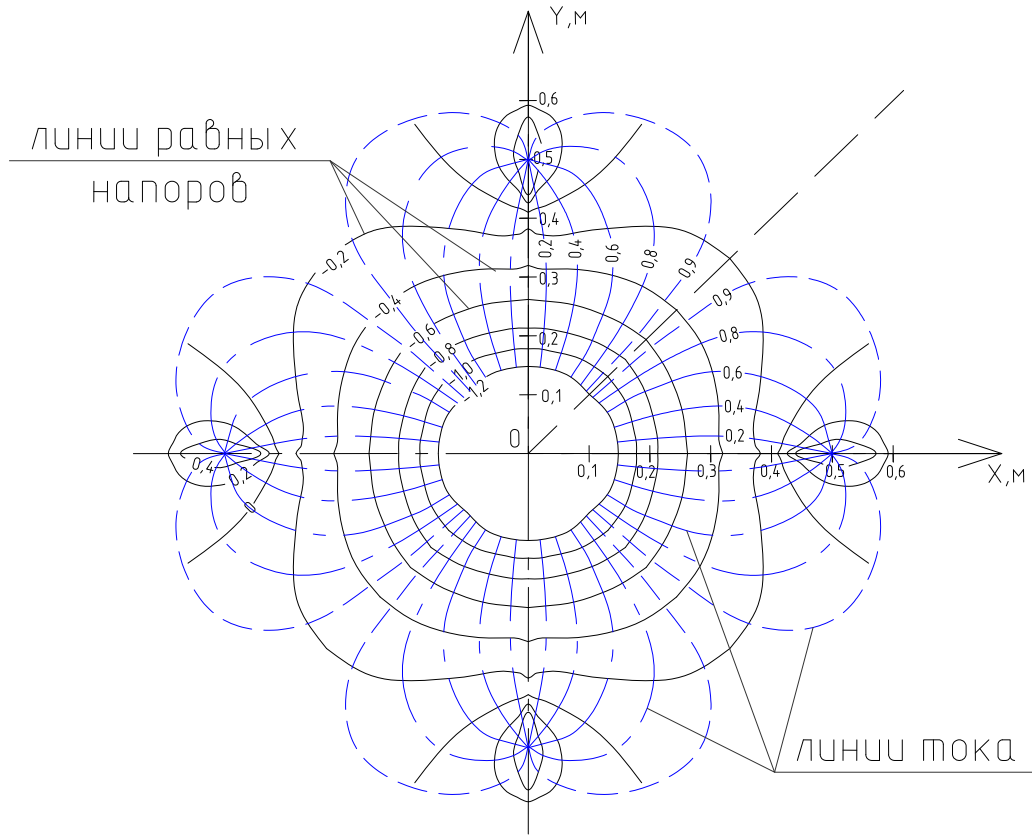


Рис.2. Гидродинамическая сетка фильтрации при 4-скважинной затрубной системе реагентной промывки

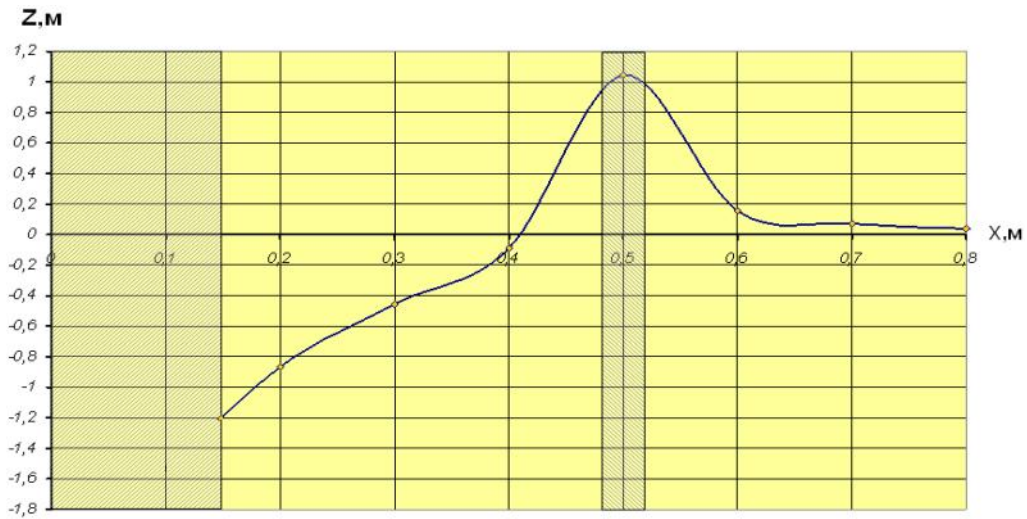


Рис.3. Кривая изменения напора в профиле Оч между заборной и нагнетательной скважинами

выщелачивания пропорциональна скорости фильтрации. Отсюда следует, что чем больше затрубная промывная система содержит нагнетательных скважин, тем лучше охват зоны кольматации потоками реагента и меньше время выщелачивания. Однако в этом случае из-за появления дополнительного сопротивления снижается пропускная способность гравийной обсыпки и растет стоимость системы промывки. Необходима оптимизация количества нагнетательных скважин.

К технологическим параметрам циркуляционной регенерации относятся расход  $Q$  и потребное количество  $M$  реагента, время процесса декольматации  $T$ . Для осуществления контроля за процессом выщелачивания необходимо производить непрерывный мониторинг величин расхода откачки и закачки, концентрации реагента, уровней в скважинах.

Потребное количество  $M$  реагента определяют по стандартной методике [3]. Величину расхода  $Q$  закачки-откачки определяют исходя из недопущения подъема уровня реагента выше устья нагнетательных скважин и снижения уровня  $S$  в водозаборной скважине ниже допустимой отметки, т. е. должны соблюдаться условия:

$$Z < H_{cm}; \quad S < S_{don}, \quad (7)$$

где  $H_{cm}$  – расстояние от устья до статического уровня;  $Z$  – превышение уровня в нагнетательной скважине над статическим уровнем;  $S_{don}$  – допустимое снижение уровня в водозаборной скважине.

В процессе извлечения из прифильтровой зона кольматирующих отложений можно выделить две основные стадии: первая – вытеснения реагентом воды из порового пространства прифильтровой зоны; вторая – циркуляции реагента в прифильтровой зоне до окончания выщелачивания отложений.

Тогда общее время процесса

$$t_n = t_e + t_p \quad (8)$$

где  $t_e$  – продолжительность вытеснения;  $t_p$  – продолжительность растворения (выщелачивания).

Приближенно время  $t_e$  может быть найдено расчетным путем как время движения жидкости по главной линии тока. Согласно теоретической зависимости [4]

$$t_e = \frac{n}{n+2} \frac{\rho m n_0 L^2}{Q} \quad (9)$$

где  $n_0$  – начальная пористость;  $L$  – расстояние между нагнетательной и водозаборной скважинами.

Опытным путем время  $t_e$  может быть найдено по скачку электропроводности в воде, откачиваемой из водозаборной скважины. С этого момента времени откачиваемая жидкость может направляться в циркуляционный резервуар и участвовать в регенерации (см. рис.1).

Продолжительность выщелачивания  $t_p$  будет определяться по времени окончания процесса растворения кольматанта в самых неблагоприятных периферийных участках зоны кольтации, характеризующихся низкими скоростями фильтрации. Для определения величины скорости фильтрации можно воспользоваться следующей методикой. На построенной в масштабе гидродинамической сетке (рис.2) выбирают на периферийном участке самый широкий пояс и измеряют курвиметром его наибольшую ширину, которая соответствует длине  $\Delta l_{max}$  участка пути фильтрации по крайней линии тока между соседними линиями равных напоров со значениями напоров  $H_1$  и  $H_2$ . Наименьшую скорость  $u_{min}$  фильтрации определяем по формуле Дарси:

$$u_{min} = k \frac{H_1 - H_2}{\Delta l_{max}} \quad (10)$$

В работе [5] при исследовании продолжительности выщелачивания  $t$  железистых отложений дитионитом натрия в зависимости от скорости  $u$  фильтрации реагента была получена зависимость вида

$$\bar{t} = a \ln \bar{u} + b \quad (11)$$

где  $\bar{t} = \frac{t}{t_{max}}$  – продолжительность процесса выщелачивания в режиме реагентной ванны;  $a, b$  – эмпирические коэффициенты.

$$\bar{u} = \frac{u}{u_{max}} \quad u_{max} - \text{максимальная скорость циркуляции.}$$

Выразив продолжительность выщелачивания  $t$  при скорости  $u$ , из формулы (11) получим

$$t = t_{max} \left[ a \cdot \ln \left( \frac{u}{u_{max}} \right) + b \right] \quad (12)$$

Для кольматанта Минского водозабора «Острова» значения коэффициентов  $a$  и  $b$  составили:  $a = -0,15$ ,  $b = 0,04$ ;  $t_{max} = 180$  мин;  $u_{max} = 1,51$  см/с.

При наличии проб кольматанта данного водозабора подземных вод производят тестирование реагентов и по методике работы [5] определяют значения  $a, b, t_{max}, u_{max}$ . Затем, подставив в формулу (12) значение  $u_{min}$  из формулы (10), находят продолжительность  $t_p$  выщелачивания:

$$t_p = t_{max} \left[ a \cdot \ln \left( \frac{u_{min}}{u_{max}} \right) + b \right] \quad (13)$$

Более точно продолжительность  $t_p$  выщелачивания (полное время растворения) определяют опытным путем по стабилизации электрического сопротивления откачиваемого реагента. Контроль процесса растворения также производят по стабилизации перепада уровней в водозаборных и нагнетательных скважинах.

Для ликвидации железо- и сульфатобактерий, продукты жизнедеятельности которых также накапливаются в порах гравийной обсыпки, в циркуляционные скважины можно закачивать дезинфицирующий раствор и также производить его циркуляцию.

### **Заключение**

Анализ основных закономерностей циркуляционного движения реагента в при-фильтровой зоне регенерируемой скважины, создаваемого путем подачи реагента в несколько нагнетательных скважин, симметрично расположенных в прифильтровой зоне регенерируемой скважины, и откачки из нее профильтрованного раствора с последующей его подачей в нагнетательные скважины позволил на основе построения гидродинамической сетки фильтрационного потока в камере растворения разработать методика расчета основных технологических параметров циркуляционной регенерации.

### **Литература**

1. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении: пат. 9453 Респ. Беларусь, МПКС1, E21B43/00, B03B 03/00 /В.В. Ивашечкин, А.Н.Кондратович, И.А. Герасименко, Н.И. Крук, И.В. Рытько; заявитель Белор. национ. техн. ун-т. – № а20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 30/06/2005//Афіцыйны бюл./цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006.
2. Ивашечкин, П.А., Автушко П.А. Повышения долговечности водозаборных скважин/В.В. Ивашечкин, П.В. Автушко// Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7 Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23-24 мая 2009 г.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 2. С. 12.
3. Ивашечкин, В.В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения/В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 277 с.
4. Аренс, В.Ж. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых / В. Ж. Аренс, А. М. Гайдин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
5. Шейко, А.М. Лабораторные исследования кинетики выщелачивания кольматирующих отложений дитионитом натрия/ А.М. Шейко, В.В. Ивашечкин// Мелиорация переувлажненных земель. – 2007. – № 2. – С. 163-170.

### **Summary**

#### ***V. V. Ivashchkin, P.A. Avtushko. Circulating Regeneration of Water Intake Well Equipped with Hole System of Reagent Flushing***

Presented: New structure of water intake well equipped with a hole system of reagent flushing, and process flowchart of circulating regeneration. Considered: hydrodynamics of circulating streamflow in prefiltered zone of well and basic rated dependences for plotting of hydrodynamic network. Developed: calculation procedure of basic process parameters of circulating regeneration.

Поступила 27 декабря 2009 г.