

**ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ
ЖИДКОСТИ В ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПРИ ЕЕ РЕГЕНЕРАЦИИ
ЦИРКУЛЯЦИОННО-РЕАГЕНТНЫМ МЕТОДОМ**

Ю.А. Медведева, магистрант

В.В. Ивашечкин, доктор технических наук, профессор
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Аннотация

В данной статье рассматривается установившееся движение жидкости в прифилтровой зоне скважины при ее регенерации циркуляционно-реагентным методом с помощью пробуренных в ее ближней зоне дополнительных мелкотрубчатых скважин. Проводится теоретическое и экспериментальное исследование фильтрационного потока при регенерации в прифилтровой зоне скважины.

Ключевые слова: скважина, регенерация, прифилтровая зона, циркуляция, гидродинамика

Abstract

Ju. A. Medvedeva, V.V. Ivashchkin
STUDY OF LIQUID MOTION IN PRE-FILTER ZONE DURING REGENERATION BY CIRCULATION REAGENT METHOD

This article shows formed liquid motion in pre-filter zone of the well during its regeneration by circulation reagent method carried out due to drilled additional well with tubes of small diameter in its near zone. Filtration flow is investigated both theoretically and experimentally during its regeneration in pre-filter zone.

Keywords: well, regeneration, pre-filter zone, circulation, hydrodynamic

Постоянно растущий спрос на потребление подземных вод, значительное удорожание строительства новых водозаборных скважин и недостаточная эффективность существующих методов их регенерации делают актуальным продление срока службы подземных водозаборов.

Для регенерации скважин, закольматированных пластичными или рыхлыми осадками применяются множество способов регенерации. Например, импульсный метод регенерации. Импульсное воздействие на скважины является одним из наиболее широко распространенных методов регенерации. Это во многом связано с относительной простотой применяемого оборудования и ощутимым эффектом, достигаемым при регенерации. Опыт импульсных работ скважин и позволяет сделать вывод о возможности восстановления производительности скважин до 40...70 % от первоначальной [1]. В настоящее время наибольшее распространение получили электрогидроударный и пневмоимпульсный способы.

Также широко применяются реагентные методы регенерации скважин. Например, способ реагентной ванны, способ циклического задавливания и циркуляционный способ. Все эти способы реализуются внутри фильтров и поэтому недостаточно эффективны для декольматации гравийной обсыпки.

На крупных подземных водозаборах городов

сооружают высокодебитные водозаборные скважины. При интенсивной круглосуточной эксплуатации, в их фильтрах и прифилтровой зонах выпадает большой объем кольматирующих отложений. Удалить полностью кольматирующие отложения традиционными методами изнутри фильтра не удастся, так как отложения расположены на значительном удалении от фильтра. Скважину приходится тампонировать и бурить новую, что очень дорого. Срок службы таких скважин редко превышает 18-20 лет.

В БНТУ на кафедре «Гидротехническое и энергетическое строительство» предложен способ циркуляционно-реагентной регенерации скважины путем закачки реагента в специально пробуренные в её ближней зоне (0,5-2 м) мелкотрубчатые скважины.

Теоретические исследования фильтрационного потока. Цель работы – теоретическое и экспериментальные исследования установившегося движения жидкости в прифилтровой зоне водозаборной скважины при закачке в её прифилтровую зону жидкости через мелкотрубчатые скважины.

Для регенерации восстанавливаемой скважины 1, которая состоит из эксплуатационной колонны 2 и фильтра 3 с отстойником, в ближней зоне скважины сооружают несколько мелкотрубчатых скважин 4, состоящих из эксплуатационных труб 5 и фильтров 6 с отстойниками (рисунок 1).

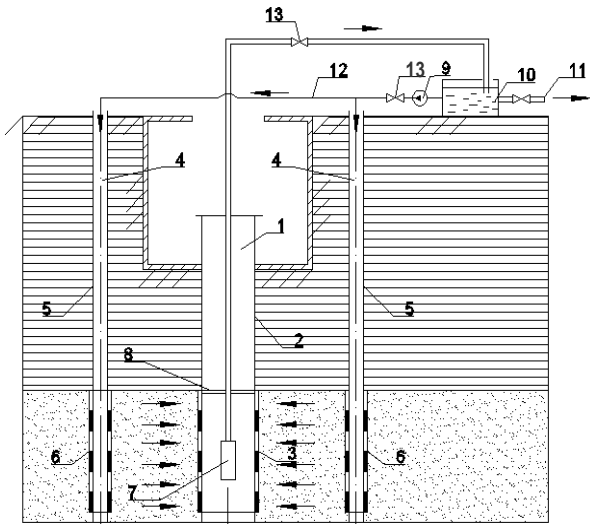


Рисунок 1. – Технологическая схема промывки скважины

Регенерация восстанавливаемой скважины 1 производится с помощью установки для регенерации, содержащей погружной реагентный насос 7, опускаемый в фильтр восстанавливаемой скважины 1, пакер 8, устанавливаемый между фильтровой и надфильтровой зонами восстанавливаемой скважины 1 для разрыва их гидравлической связи, реагентный насос 9, емкость с реагентом 10 со сливом 11, распределительную систему 12 с задвижками 13.

Регенерация восстанавливаемой скважины 1 осуществляется следующим образом. С помощью реагентного насоса 9 из емкости 10 по распределительной системе 12 непрерывно подают реагент в мелкотрубчатые скважины 4. Одновременно реагент откачивают из-под пакерного пространства погружным реагентным насосом 7 назад в емкость 10. Реагент растворяет кольятант в гравийной обсыпке и фильтре и промывает восстанавливаемую скважину 1.

Рассмотрим гидродинамику движения фильтрационного потока жидкости от нескольких дополнительных мелкотрубчатых скважин, работающих в режиме закачных, к одной откачной (водозаборной) скважине.

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 мелкотрубчатых скважин начинает поступать расход раствора Q/n . В части пласта, примыкающего к водозаборной скважине,

формируется депрессия, а у мелкотрубчатых скважин – репрессия (рисунок 2). Для напорного пласта установившийся режим фильтрации наступает практически мгновенно.

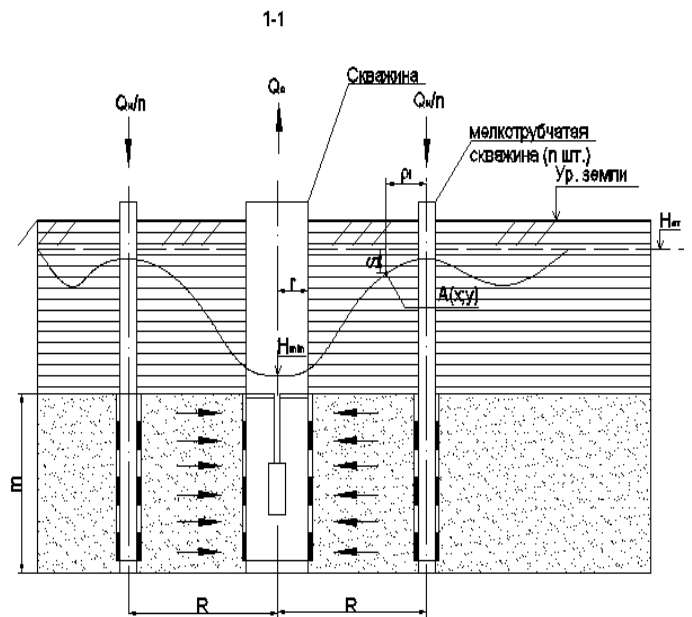


Рисунок 2. – Схема к гидродинамическому расчету системы реагентной промывки

Для простейшей лучевой схемы взаимодействия скважин при циркуляционной регенерации, представленной на рисунке 2, можно использовать общее уравнение для расчета изменения уровня в любой точке прифильтровой зоны после установления квазиустановившегося движения [2]:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left(\ln \frac{2,25at}{r^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{2,25at}{\rho_i^2} \right) = \frac{Q}{4\pi km} \left(-\ln r^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \rho_i^2 \right), \quad (1)$$

где r – расстояние от водозаборной скважины радиусом r_0 до точки, в которой определяется понижение; ρ_i – расстояние от i -ой мелкотрубчатой скважины до точки, в которой определяется понижение; n – число мелкотрубчатых скважин; k – коэффициент фильтрации прифильтровой зоны; m – мощность пласта; t – время от начала работы системы; a – коэффициент пьезопроводности.

Уравнение (1) получено на основе метода наложения фильтрационных течений [3].

Для построения гидродинамической сетки необходимо в выражении (1) перейти от полярных координат к прямоугольным координатам, расположив

начало в центре водозаборной скважины, а ось абсцисс, проходящей через n -ую мелкотрубчатую скважину. Тогда получим [2]:

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2 \\ \rho^2_i &= (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2; \\ x_i &= R \cos \alpha; \\ y_i &= R \sin \alpha; \\ \alpha &= \frac{2\pi}{n} i, \end{aligned} \quad (2)$$

где x, y – координаты точки, в которой определяется изменение уровня; x_i, y_i – координаты мелкотрубчатых скважин; α_i – угол между лучом, проходящим из начала координат через мелкотрубчатую скважину с номером i , и осью абсцисс; R – расстояние от мелкотрубчатой до водозаборной скважины.

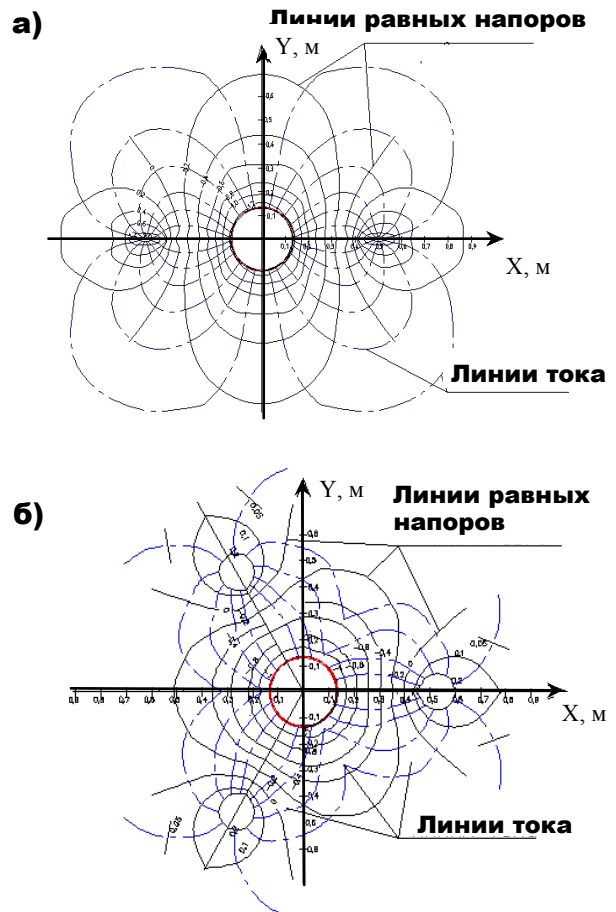
С учетом выражений (2) уравнение (1) принимает вид:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \left\{ -\ln(x^2 + y^2) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \ln \left[(x - R \cos \frac{2\pi}{n} i)^2 + (y - R \sin \frac{2\pi}{n} i)^2 \right] \right\} \right\}. \quad (3)$$

Из соображений экономической целесообразности мелкотрубчатых скважин не может быть более трех штук. Учитывая это, построим гидродинамические сетки для водозаборной скважины с радиусом фильтра $r_c = 0,14$ м и с двумя и тремя дополнительными мелкотрубчатыми скважинами при следующих исходных данных: мелкотрубчатые скважины располагаются на расстоянии $R = 0,5$ м от водозаборной, проницаемость пласта – $k_m = 10^{-3}$ м²/с, расход жидкости, откачиваемый из водозаборной скважины – $Q = 0,006$ м³/с = 21,6 м³/час.

Для построения гидродинамической сетки воспользуемся уравнением (3). Расчет удобно выполнять в форме таблицы с использованием ЭВМ. Задавая координаты x и y , подставив исходные данные в уравнение (3), определяем изменение напора S в данной точке. На рисунках 3а и 3б показаны соответственно гидродинамические сетки фильтрации для двух и трех дополнительных мелкотрубчатых скважин.

Анализ гидродинамической сетки показывает, что на периферийных участках зоны кольматации ширина поясов сетки, кривизна и длина линий тока,



а) $n=2$; б) $n=3$;
 $R = 0,5$ м; $k_m = 10^{-3}$ м²/с, $Q = 0,006$ м³/с

Рисунок 3. – Гидродинамическая сетка фильтрации

выходящих из мелкотрубчатых скважин, наибольшая. Это указывает на то, что скорость вдоль этих линий меньше, чем по главной линии тока (кратчайшей линии, соединяющей мелкотрубчатую и водозаборную скважины). Следовательно, периферийные сегменты зоны кольматации, лежащие между мелкотрубчатыми скважинами, будут выщелачиваться медленнее, чем участки, лежащие между водозаборной и мелкотрубчатыми скважинами, так как скорость выщелачивания пропорциональна скорости фильтрации. Отсюда следует, что чем больше система содержит мелкотрубчатых 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 мелкотрубчатых скважин.

Рассматривая гидродинамические сетки для двух и трех дополнительных мелкотрубчатых скважин заметно, что при трех дополнительных скважинах очистка будет проходить более равномерно, чем при двух скважинах.

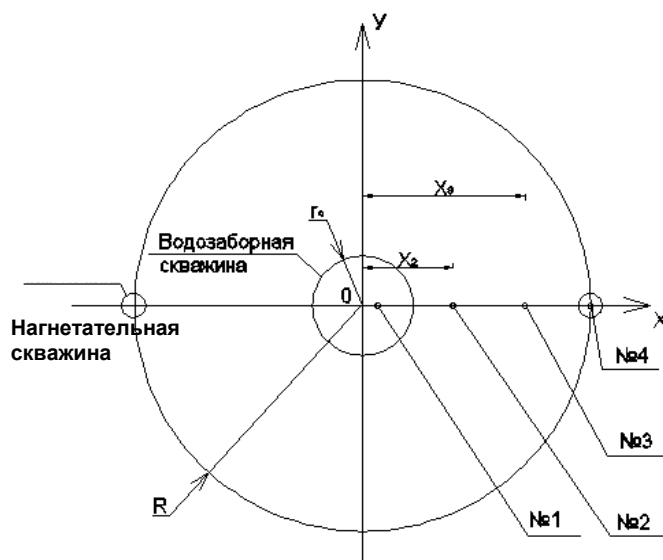
Экспериментальное исследование фильтрационного потока. При циркуляционно-реагентной регенерации скважин фильтрационный поток реагента должен иметь такие параметры, чтобы обеспечить равномерное растворение и удаление отложений во всей закольматированной прифилтровой зоне и на фильтре. В общем случае к параметрам фильтрационного потока относят: скорость фильтрации и напор в заданной точке прифилтровой зоны, которые зависят от ряда факторов: количества циркуляционных скважин, их расстояний от водозаборной скважины, циркуляционного расхода, мощности пласта и коэффициента фильтрации грунта.

На практике для восстановления скважины, снизившей свой дебит, путем бурения дополнительных мелкотрубчатых скважин в них необходимо непрерывно подавать реагент из специальной емкости (рисунок 1). При этом в водозаборной скважине нужно создать с помощью эрлифта или специального насоса депрессию, которая заставит реагент от мелкотрубчатых скважин двигаться в сторону водозаборной скважины через закольматированную гравийную обсыпку и фильтр скважины. Раствор реагента из восстанавливаемой скважины необходимо откачивать назад в емкость, откуда он опять будет поступать в мелкотрубчатые скважины. Таким образом будет происходить принудительная циркуляция реагента.

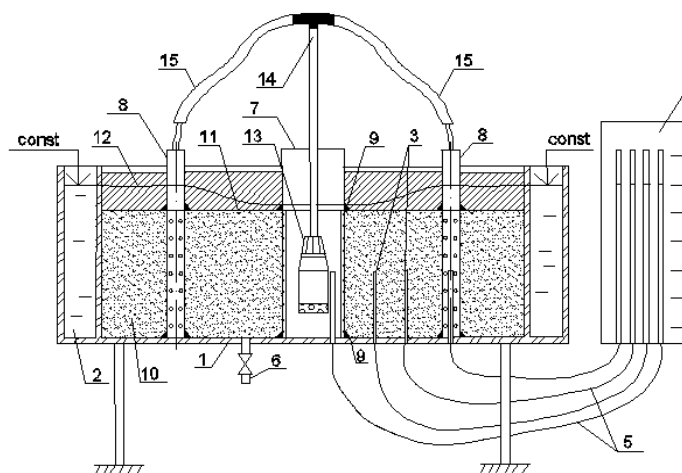
Экспериментальные исследования такого циркуляционного фильтрационного движения жидкости проводились на экспериментальной установке (рисунки 4, 5 и 6).



Рисунок 4. – Общий вид экспериментальной установки



$R=0,3\text{ м}; x_1=0,07\text{ м}; x_2=0,125\text{ м}; x_3=0,22\text{ м}; x_4=0,3\text{ м}$
Рисунок 5. – Схема размещения пьезометров



- 1 – фильтрационный бак; 2 – кольцевой бьеф;
- 3 – пьезометры; 4 – щит пьезометров;
- 5 – шланги; 6 – сливной патрубков;
- 7 – водозаборная скважина; 8 – мелкотрубчатые скважины; 9 – уплотнение; 10 – водовмещающий грунт; 11 – полиэтиленовая пленка;
- 12 – глиняный замок; 13 – насос;
- 14 – напорный шланг; 15 – подающие шланги

Рисунок 6. – Схема экспериментальной установки

Установка состояла из радиального фильтрационного лотка 1 диаметром 1,22 м и высотой 0,5 м с кольцевым бьефом 2. Внутри лотка 1 устанавливалась модель фильтра совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины 7.

В прифилтровой зоне водозаборной скважины 7 установлены две мелкотрубчатые скважины 8. Бак засыпан на высоту 0,3 м кварцевым песком 10. В днище бака встроены водоприемники пьезометров 3, которые соединяются с пьезометрическим щитом 4 гибкими шлангами 5. Пьезометры расположены вдоль главной линии тока.

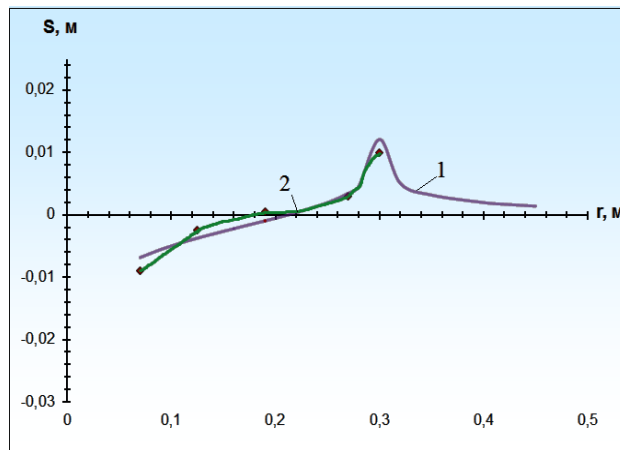
В баке предусмотрен слив 6. Во избежание заземления воздуха, грунт закладывался в воду с послойным трамбованием. Для обеспечения условий напорной фильтрации в грунте 10 при циркуляции, на его поверхности была уложена полиэтиленовая пленка 11 толщиной 2 мм с глиняным замком 12, который был дополнительно пригружен. Таким образом, модель напорного пласта имела мощность $m = 0,3$ м. Водозаборная и мелкотрубчатые скважины имели нижние и верхние уплотнения 9 в местах их примыкания к днищу бака и на контакте с полиэтиленовой пленкой 11. В водозаборную скважину помещали насос 13, который откачивал из нее воду в напорный шланг 14 и распределялся по подающим шлангам 15.

Фильтр скважины представлял собой трубчатый полиэтиленовый каркас внутренним диаметром 125 мм (5 дюймов). Диаметр отверстий в каркасе составлял 12 мм. Отверстия располагались в шахматном порядке. Снаружи каркас обматывался полиэтиленхолстом толщиной $\delta = 7,5$ мм. В опытах использовался кварцевый песок (ТУ РБ 100016844.241-2001), искусственно закольматированный природными железистыми отложениями. В качестве водоподъемного оборудования использовался насос «Ручеек -1» (БВ-0.12-40-У5, ГОСТ 26287-84).

Установка работала следующим образом. Вода насосом забиралась из модели скважины с расходом Q_c в напорный шланг, а затем из сливных шлангов подавалась через подающие шланги самотеком в мелкотрубчатые скважины с расходом $Q_n = Q_c$. Давление в пласте при фильтрации регистрировали с помощью пьезометров.

С целью проверки правомерности применения полученной зависимости (3) для описания поля напоров при зафилтровой промывке совершенной

водозаборной скважины по степени вскрытия водоносного горизонта в напорном пласте был проведен ряд лабораторных экспериментов. Сопоставление результатов опытов и расчетов по определению напора вдоль главной линии тока представлено на рисунке 7.



$$Q_c = Q_n = 0,064 \text{ л/с}; m = 0,35 \text{ м};$$

$$R = 0,3 \text{ м}; k = k_{\text{ф}} = 0,0071 \text{ м/с};$$

1 – теория;

2 – эксперимент

Рисунок 7. – Сопоставление экспериментальных исследований и расчетов при определении напора в профиле $0x$ между водозаборной скважиной и нагнетательной трубкой в процессе зафилтровой промывки (напорное движение)

Анализ теоретических и опытных данных показал, что относительное отклонение напоров вдоль главной линии тока не превышает 10 %. Это свидетельствует о возможности использования расчетной зависимости (3) для построения поля напоров и определения скоростей и градиентов фильтрации в прифилтровой зоне водозаборных скважин при их промывке с целью назначения необходимых режимов регенерации.

Выводы

В результате теоретических исследований на основе метода наложения фильтрационных течений получена зависимость для описания установившегося движения в прифилтровой зоне водозаборной скважины при ее циркуляционно-реагентной промывке с помощью дополнительных мелкотрубчатых скважин, пробуренных в ее ближней зоне. Предложенная зависимость позволяет определить напор и скорость

жидкости в любой точке промываемой прифилтровой зоны с постоянной проницаемостью.

Проведенные экспериментальные исследования изменения напоров вдоль главной линии тока, соединяющей оси скважины и одной из нагнетательных скважин при установившемся движении в при-

филтровой зоне модели водозаборной скважины, показали, что относительное отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований для прифилтровой зоны с постоянной проницаемостью не превышает 10 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. – М. : Стройиздат, 1990. – 256 с.
2. Аренс, В. Ж. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых / В. Ж. Аренс, А. М. Гайдин. – М. : Недра, 1978. – 215 с.
3. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев [и др.]; под. ред. Ф. М. Бочевера. – М. : Стройиздат, 1976. – 292 с.

Поступила 18.11.2016 г.