

УДК 628.112

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИНЫ, ОСНАЩЕННОЙ ЗАТРУБНОЙ СИСТЕМОЙ РЕАГЕНТНОЙ ПРОМЫВКИ

**Канд. техн. наук ИВАШЕЧКИН В. В., инж. АВТУШКО П. А.,
студ. КОЛЕДЮК Д. А.**

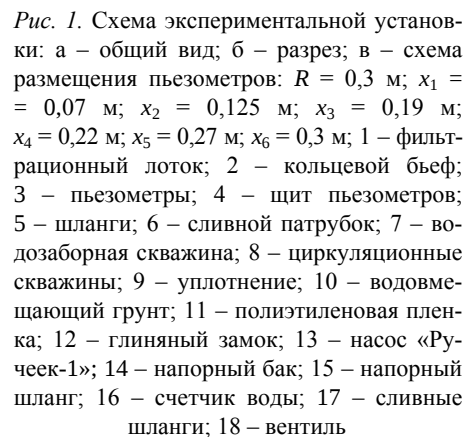
Белорусский национальный технический университет

На кафедре гидравлики Белорусского национального технического университета разработана новая конструкция ремонтпригодной скважины, основным отличием которой от традиционных конструкций является размещение в фильтрующей обсыпке специальных циркуляционных скважин малого диаметра, предназначенных для обеспечения циркуляции реагента в объеме гравийной обсыпки [1, 2]. Во время регенерации в циркуляционные скважины непрерывно подается реагент из специальной емкости. В это время в водозаборной скважине с помощью эрлифта или специального насоса создается депрессия, которая заставляет реагент от циркуляционных скважин двигаться в сторону водозаборной скважины через закольматированную гравийную обсыпку. Откачиваемый реагент возвращается в емкость и опять поступает в циркуляционные скважины.

Фильтрационный поток реагента должен иметь такие параметры, чтобы обеспечить равномерное растворение и удаление отложений во всей закольматированной прифильтровой зоне и на фильтре. В общем случае параметры фильтрационного потока – скорость фильтрации и напор в заданной точке прифильтровой зоны – зависят от ряда факторов: количества циркуляционных скважин, их расстояний от водозаборной скважины, циркуляционного расхода, мощности пласта и коэффициента фильтрации грунта.

Взаимосвязь этих величин в применении к скважинной добыче полезных ископаемых, осуществляемой посредством системы закачных и откачных скважин, описывает уравнение Дюпюи [3]. В таких системах закачные скважины находятся на значительных расстояниях от откачной скважины. В [4] предложено использовать те же зависимости для расчета циркуляционного движения жидкости в прифильтровой зоне скважины. Толщина этой зоны соответствует толщине гравийной обсыпки и редко превышает 0,4 м. Учитывая малые размеры зоны циркуляции, представляло интерес

Экспериментальные исследования циркуляционного фильтрационного движения жидкости проводились на установке (рис. 1).



В баке предусмотрен слив. Во избежание зацементирования воздуха грунт закладывался в воду с послойным трамбованием. Для обеспечения усло-

вий напорной фильтрации в грунте при циркуляции на его поверхности уложена полиэтиленовая пленка толщиной 2 мм с глиняным замком, который был дополнительно пригружен. Таким образом, модель напорного пласта имела мощность $m = 0,3$ м. Водозаборная и циркуляционные скважины имели нижние и верхние уплотнения в местах их примыкания к днищу бака и на контакте с полиэтиленовой пленкой. В водозаборную скважину помещали насос, который откачивал из нее воду в напорный бак. На напорном шланге насоса были установлены расходомер и вентиль для регулировки расхода. Из бака в нагнетательные скважины подведены сливные шланги.

Фильтр скважины представлял собой трубчатый полиэтиленовый каркас внутренним диаметром 125 мм. 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 соответствии с методикой эксперимента вначале определяли коэффициент фильтрации закольматированного песка на приборе Дарси, который составил: $k = 0,7$ см/с. По методике [5] определялась критическая скорость $v_{кр}$ фильтрации, при которой происходит нарушение закона Дарси. Для этого строился график зависимости средней скорости фильтрации v от градиента фильтрации I , т. е. $v = f(I)$ (рис. 2).

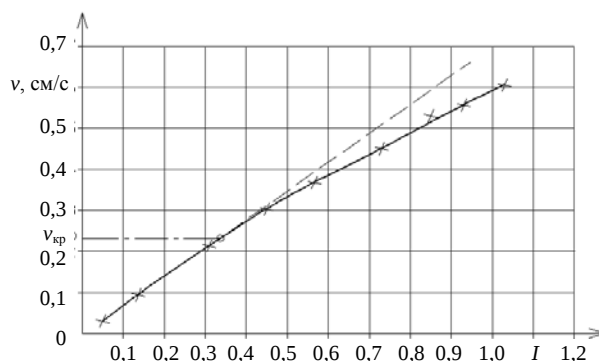


Рис. 2. График зависимости средней скорости фильтрации v от градиента фильтрации I песка при фильтровой зоны

Критическая скорость $v_{кр}$ фильтрации для грунта составила $v_{кр} = 0,23$ см/с. В опытах значения местных скоростей в прифильтровой зоне не превышали это значение. Воду из водозаборной скважины с расходом Q , который регулировали вентилем, подавали насосом в напорный бак, откуда она под действием напора поступала по сливным шлангам в циркуляционные скважины. Водозаборная скважина работала в режиме дренажной скважины, а циркуляционные – в режиме нагнетательных скважин (рис. 1). Под действием перепада напорov в прифильтровой зоне через пять–семь минут после включения насоса формировалось установившееся напорное движение воды, признаками которого являлась стабилизация отметок уровней воды в напорном баке и пьезометрах. Расход Q измерялся по счетчику воды, а напоры по главной линии тока – по пьезометрам.

Теоретическая кривая строилась по выражению [3]

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

где n – число закачных скважин.

На рис. 3 представлены экспериментальная и теоретическая кривые изменения напора по главной линии тока между дренажной и нагнетательной скважинами.

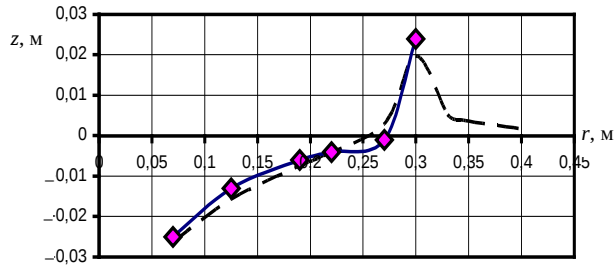


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных исследований и расчетов по (1) при определении напора в профиле Ox между откачной и закачной скважинами в процессе циркуляции жидкости: $n = 4$; $Q = 0,242$ л/с; $k = 0,7$ см/с; $R = 0,3$ м; $m = 0,3$ м; --- – теоретическая кривая; —◆— – опытная кривая

Анализ теоретических и опытных данных (рис. 3) показывает хорошую их сходимость, за исключением циркуляции жидкости в прифильтровой зоне нагнетательной скважины, где сказывалось сопротивление ее фильтра. Сходимость результатов расчетов и опытных данных свидетельствует о возможности использования расчетной зависимости (1) для описания поля напоров и расчета скорости фильтрации в прифильтровой зоне скважины, а также для определения конструктивных параметров системы затрубной реагентной промывки.

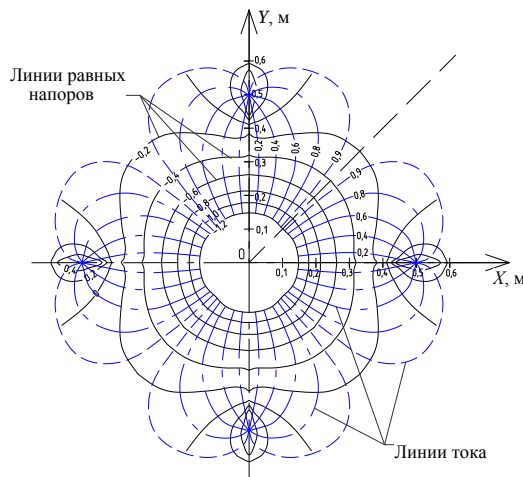


Рис. 4. Гидродинамическая сетка фильтрации при: $n = 4$; $R = 0,5$ м; $km = 10^{-3}$ м²/с; $Q = 0,006$ м³/с

На следующем этапе определялось влияние количества нагнетательных скважин n на величину средней скорости фильтрации в самых неблагоприятных, с точки зрения промывки, секторах прифильтровой зоны, лежащих между нагнетательными скважинами. Для этого для каждого значения n строилась гидродинамическая сетка и на ней выбиралась линия тока, совпадающая с биссектрисой угла (штриховая линия на рис. 4), образующего сектор между двумя соседними нагнетательными скважинами.

Затем определялись по формуле Дарси значения скорости фильтрации между соседними линиями равных напоров $u = k \frac{\Delta z}{\Delta l}$, где Δl – расстояние между линиями равных напоров. Как среднее арифметическое определялось значение средней скорости $\bar{u}$ на участке $R - r_0$ всей линии тока, обозначенной штриховой линией на рис. 4.

На рис. 5 представлен график $\bar{u} = f(n)$.

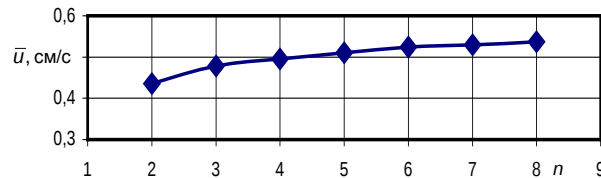


Рис. 5. График зависимости $\bar{u} = f(n)$ при: $R = 0,5$ м; $km = 10^{-3}$ м²/с; $Q = 0,006$ м³/с

Из анализа графика (рис. 5) следует, что при увеличении числа нагнетательных скважин n средняя скорость фильтрации $\bar{u}$ в центральной части сектора между нагнетательными скважинами возрастает. Это указывает на увеличение скорости растворения кольматанта в этой зоне. Однако темпы роста средней скорости $\bar{u}$ с ростом числа нагнетательных скважин n неодинаковы: при увеличении n в диапазоне от 2 до 4 значение $\bar{u}$ возрастает на 13,5 %, с ростом n от 4 до 6 – на 5,8 %, с ростом n от 6 до 8 – только на 2,5 %. Отсюда следует, что количество нагнетательных скважин следует рекомендовать в диапазоне $4 < n < 6$. Дальнейшее их увеличение нецелесообразно, так как позволит лишь в незначительной степени сократить время регенерации.

Изучение процесса циркуляционно-реагентной регенерации скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки, осуществлялось на экспериментальной установке, представленной рис. 1. Для определения эффективности регенерации вначале определялись гидравлические характеристики скважины с незакольматированной прифильтровой зоной, затем – с искусственно закольматированной и в конце – характеристики скважины после регенерации.

Коэффициент фильтрации прифильтровой зоны находится по формуле

$$k_n = \frac{Q \ln \frac{r_n}{r_c}}{2\pi m(S_0 - S_n)}, \quad (2)$$

где r_n – расстояние от оси водозаборной скважины до пьезометра, $r_n = 0,21$ м; r_c – внутренний радиус фильтра, $r_c = 0,06$ м; m – мощность пласта, $m = 0,3$ м; S_0 , S_n – соответственно понижения уровня в скважине и пьезометре.

Коэффициент фильтрации k пласта, сложенного однородным кварцевым песком (ТУ РБ 100016844.241–2001), который используется при сооружении гравийных обсыпок водозаборных скважин, оценивался на приборе Дарси и составил $k = 0,7$ см/с, а показатель обобщенного сопротивления ζ фильтра и прифильтровой зоны в предположении, что проницаемость постоянна во всем рассматриваемом участке скважина–пьезометр, – по формуле [6]

$$\zeta = \left(\frac{k}{k_n} - 1 \right) \ln \frac{r_n}{r_c}. \quad (3)$$

Прифильтровую зону искусственно кольматировали цементированным железосодержащим осадком и цементом. Для этого приготавливали смесь однородного кварцевого фильтрующего песка (ТУ РБ 100016844.241–2001), кольматанта и цемента М500 в отношении 1:0,3:0,1. В смеси использовался кольматант из фильтра скважины № 36 водозабора «Северный» г. Жодино, извлеченный в процессе газоимпульсной регенерации. Согласно химическому анализу кольматант содержал 72 % Fe₂O₃, 3 % СаО. Добавка цемента к кольматанту способствовала сцеплению и удержанию кольматирующего осадка на частицах песка, что имитировало естественную химическую кольматацию в прифильтровой зоне, которая образуется за период пяти и более лет эксплуатации скважины. Для обеспечения равномерности зоны кольматации по высоте и толщине, смесь загружалась в кольцевой зазор между фильтром с наружным диаметром 140 мм и трубой диаметром 280 мм, которая затем извлекалась. Таким образом, закольматированная кольцевая зона имела постоянную по высоте толщину $\delta = 7$ см и высоту $m = 30$ см, равную мощности водоносного пласта. Заполненный водой при температуре 18 °С фильтрационный лоток отстаивался трое суток.

В качестве реагента в опытах использовалось кислотное очищающее средство «Дескам» (ТУ РБ 37430824.001–97), содержащее 20 % HCl. Количество реагента подбиралось исходя из баланса веществ, вступающих в реакцию



Согласно уравнению реакции (4) для полного растворения 160 г Fe₂O₃ требуется 216 г HCl, тогда соотношение масс исходных веществ, вступающих в реакцию, составит

$$\varphi = \frac{M_{\text{HCl}}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} = \frac{216}{160} = 1,35. \quad (5)$$

По данным химического анализа, весовая доля Fe₂O₃ в составе кольматирующих отложений составляет $\alpha = 0,72$.

По результатам растворения кольматанта в лабораторных условиях степень превращения железа составила 90 %, т. е. степень использования кислоты $\beta = 0,9$.

Тогда значение коэффициента стехиометрии

$$K_c = \varphi \alpha \beta = 1,35 \cdot 0,72 \cdot 0,9 = 0,87. \quad (6)$$

Количество хлористого водорода согласно [6]

$$P_{\text{HCl}} = 1,2 K_c P_k = 1,2 \cdot 0,87 \cdot 5 = 5,22 \text{ кг}, \quad (7)$$

где 1,2 – коэффициент запаса, который предусматривает 20%-й избыток реагента по отношению к расчетному для создания необходимого pH в зоне реакции; P_k – масса кольматанта, $P_k = 5$ кг.

Учитывая, что соляной кислоты в «Дескаме» содержится 20 % по массе ($f = 0,2$), потребность средства «Дескам» P будет

$$P = \frac{P_{\text{HCl}}}{f} = \frac{5,22}{0,2} = 26 \text{ кг.} \quad (8)$$

Готовый раствор помещался в напорный бак 14 (рис. 1), установленный выше статического уровня воды (рис. 1). Затем его из бака 14 по шлангам подавали в нагнетательные скважины. В это время включали насос, который откачивал жидкость из водозаборной скважины назад в бак, что обеспечивало циркуляцию реагента в прифильтровой зоне. Реакция сопровождалась выделением диоксида углерода в прифильтровой зоне при взаимодействии соляной кислоты с карбонатами, содержащимися в кольматанте, что ухудшало проницаемость прифильтровой зоны из-за кольматации пор пузырьками углекислого газа и приводило к дополнительному снижению уровня реагента в водозаборной скважине. Это указывает на то, что в пластовых условиях концентрация кислотного реагента должна быть намного меньше оптимальной концентрации соляной кислоты (20 %) при растворении железистых кольматирующих отложений. Окончание циркуляции определялось по стабилизации динамического уровня в центральной скважине, что указывало на стабилизацию коэффициента фильтрации прифильтровой зоны, при неизменных значениях статического уровня и производительности насоса. Процесс циркуляции длился 65 мин. После этого производили откачку на выброс отработанных продуктов реакции до полного их удаления с замещением их водопроводной водой, и гидравлические испытания скважины с целью определения после регенерации показателя обобщенного сопротивления ζ фильтра и прифильтровой зоны, а также удельного дебита q скважины при постоянном расходе.

Данные о результатах регенерации фильтра скважины представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные об эффективности циркуляционной регенерации прифильтровой зоны с помощью системы затрубной реагентной промывки

Удельный дебит скважины, см ² /с			Показатель обобщенного сопротивления	
До кольматации q_0	Перед регенерацией q_1	После регенерации q_2	Перед регенерацией ζ_1	После регенерации ζ_2
58	42	55	1,2	0,04

Анализ данных табл. 1 показывает, что удельный дебит через 65 мин после циркуляционной регенерации возрос примерно в 1,3 раза и составил в среднем 95 % от первоначального.

После проведения циркуляционной регенерации были выполнены вскрышные работы прифильтровой зоны, в результате в песке обнаружались лишь незначительные следы кольматирующих отложений на периферии секторов, расположенных между циркуляционными скважинами.

На рис. 6 приведены фотографии прифильтровой зоны до и после циркуляционной регенерации.

Полученные данные свидетельствуют об эффективности применения скважинной затрубной циркуляционной системы для реагентной промывки прифильтровой зоны скважины от сцементированного кольматирующего осадка с последующим удалением за ее пределы.



Рис. 6. Прифильтровая зона скважины до и после регенерации

ВЫВОДЫ

Приведены данные натурных исследований гидродинамического поля напорного циркуляционного фильтрационного потока, возникающего при работе затрубной системы реагентной промывки. Исследования показали хорошую сходимость данных эксперимента с результатами расчетов, основанных на применении уравнения Дюпюи для описания совместной работы водозаборной и нагнетательных скважин, размещенных в ее прифильтровой зоне. Это свидетельствует о возможности использования расчетных зависимостей для оценки конструктивных параметров затрубной системы промывки.

При этом количество нагнетательных скважин следует рекомендовать от четырех до шести. Дальнейшее их увеличение нецелесообразно, так как позволит лишь в незначительной степени сократить время регенерации.

Опыты по циркуляционной регенерации искусственно закольматированного скважинного фильтра, оснащенного затрубной системой промывки, обеспечили восстановление удельного дебита модели скважины на 95 % и высокое качество удаления отложений, что позволяет рекомендовать систему затрубной промывки в качестве обязательного элемента конструкции вновь сооружаемых скважин в рыхлых водовмещающих породах, позволяющего увеличить их ремонтпригодность и долговечность.

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 Бел. нац. техн. ун-т - №а20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 30/06/2006 // Афіцыйны бюл. / Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 3.
2. Ивашечкин, В. В. Повышение долговечности водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 мая 2009 г.: в 2 т. / БНТУ; редкол.: Б. М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 12.
3. Аренс, В. Ж. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых / В. Ж. Аренс, А. М. Гайдин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
4. Ивашечкин, В. В. Циркуляционная регенерация водозаборной скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко // Мелиорация. – 2010. – № 1 (63). – С. 70–77.
5. Гордеев, В. П. Руководство к практическим занятиям по гидрогеологии / В. П. Гордеев, В. А. Шемелина, О. К. Шулякова. – М.: Высш. шк., 1981. – 152 с.
6. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – М.: Недра, 1985. – 334 с.

Представлена кафедрой
гидравлики

Поступила 16.06.2010