

Циркуляционная регенерация дренажных скважин, оснащенных затрубной системой реагентной промывки

Автушко П. А., инженер, Ивашечкин В. В., доктор техн. наук,

Веременик В. В. кандидат физ.-мат. наук

(Белорусский национальный технический университет)

Описана новая конструкция дренажной скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки. Рассмотрен установившийся циркуляционный поток в прифильтровой зоне такой скважины. Получены расчетные зависимости для построения гидродинамической сетки. Приведены результаты лабораторных исследований фильтрационного потока. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетными зависимостями. Это свидетельствует о возможности использования полученных расчетных зависимостей для определения конструктивных элементов системы затрубной реагентной промывки дренажных скважин.

Ключевые слова: дренажная скважина, кольматация, регенерация, гидродинамическая сетка, циркуляция.

Вертикальный дренаж, состоящий из большого числа буровых скважин, широко применяется для защиты котлованов, промышленных, городских и сельскохозяйственных территорий от подтопления. К таким системам предъявляются особые требования по надежности и стабильности их работы. Дебит дренажных скважин зависит главным образом от совместного влияния следующих основных факторов: гидрогеологических условий участка строительства, конструкций скважин, интенсивности процессов кольматации фильтров и прифильтровых зон, режима эксплуатации системы скважин водопонижения [1, стр. 5]. В настоящее время для декольматации их фильтров применяют механические, импульсные и реагентные методы. Необходимо отметить, что эти методы позволяют воздействовать на кольматирующие отложения только изнутри фильтра скважины и поэтому недостаточно эффективны, так как основная масса отложений сосредоточена в гравийной обсыпке, которая обычно отделена от внутренней полости фильтра перфорированным каркасом с низкой скважностью 20 – 30 % и закольматированной водоприемной поверхностью. После обработки скважин в их прифильтровой зоне остается значительное количество отложений, которые, являясь центрами аккумуляции новообразований, постепенно увеличиваются в объеме и упрочняются, при этом пористость гравийной обсыпки, удельный дебит и эффективность последующих ремонтных мероприятий резко снижаются.

Для повышения эффективности работ по регенерации фильтров водозаборных и дренажных скважин, увеличения сроков службы скважинных водозаборов, систем вертикального дренажа и глубинного водопонижения в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) разработана новая конструкция ремонтнопригодной скважины [2 – 5]. В затрубном пространстве скважины на внешнем контуре обсыпки размещают несколько нагнетательных трубок малого диаметра, перфорированных со стороны фильтра (затрубная система реагентной промывки), что позволяет при подаче в них реагента осуществлять декольматацию как изнутри фильтра, так и снаружи. При регенерации реагент непрерывно подают из напорного бака, устанавливаемого у устья скважины, в нагнетательные трубки и откачивают вместе с продуктами растворения из ствола скважины назад в бак. Эффективность и качество циркуляционной обработки фильтра и гравийной обсыпки будут зависеть от ряда факторов: количества и размещения нагнетательных трубок, их расстояний от дренажной скважины, величины циркуляционного расхода, мощности безнапорного пласта и коэффициента фильтрации закольматированного грунта. Учитывая, что поле скоростей циркуляционного фильтрационного потока имеет сложную форму и скорости на удалении от фильтра дренажной скважины существенно меньше скоростей на входе в фильтр, продолжительность регенерации гравийной обсыпки будет определяться значениями скоростей на внешнем контуре обсыпки. Для определения скорости в любой точке фильтрационного потока при циркуляционной регенерации скважины возникает необходимость в построении гидродинамической сетки фильтрации. Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование гидродинамики циркуляционного фильтрационного движения при работе затрубной циркуляционной системы регенерации дренажной скважины.

Рассмотрим гидродинамику фильтрационного потока жидкости при совместной работе дренажной скважины и нескольких нагнетательных трубок, работающих в режиме нагнетательных скважин, расположенных симметрично вокруг дренажной скважины. Расчетная схема циркуляционного движения в системе «дренажная скважина — нагнетательные трубки» представлена на рис. 1.

Для нахождения уравнения, описывающего процесс совместной работы дренажной скважины и нагнетательных трубок, используем линеаризованное по методу Н. А. Багрова и Н. Н. Веригина уравнение Буссинеска для расчета неустановившегося движения грунтовых вод со свободной поверхностью [6, стр. 45]

$$a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (1)$$

где a — коэффициент пьезопроводности, характеризующий скорость снижения уровня и осушения пласта;

$$U = \frac{1}{2} (h_e^2 - h^2);$$

где h_e — статическая глубина грунтовых вод (рис. 1); h — мощность потока грунтовых вод в точке пласта с координатой r в момент времени t .

Процесс будем считать квазиустановившимся с обеспечением равенства расходов закачки и откачки. Тогда $\frac{\partial U}{\partial t} = 0$ и уравнение (1) приобретает вид

$$\frac{d^2 U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} = 0. \quad (2)$$

Зададим граничные условия

$$Q = -2\pi r k \frac{dU}{dr} \Big|_{r=r_0}, \quad (3)$$

где k — коэффициент фильтрации;

$$U(r) \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Из уравнения (2) имеем

$$\frac{dU}{dr} = \frac{C_1}{r}. \quad (5)$$

Из условия (3) находим

$$C_1 = -\frac{Q}{2\pi k},$$

$$\frac{dU}{dr} = -\frac{Q}{2\pi k r},$$

Тогда $U = -\frac{Q}{2\pi k} \ln r + C_2$.

Условие (4) будем использовать так: $U(r) = 0$ при $r \geq R$, где R — радиус влияния скважины. Тогда

$$C_2 = \frac{Q}{2\pi k} \ln R.$$

Окончательно получим

$$U = \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{R}{r}; h^2 = h_e^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r};$$

$$h = \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{R}{r}} = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{r}{R}}. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом (6) имеем уравнение для определения понижения уровня грунтовых вод S в любой точке пласта, вызванного работой дренажной скважины:

$$S = h_e - h = h_e - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{\pi \cdot k} \ln \frac{r}{R}}. \quad (7)$$

Уравнение для определения повышения уровня грунтовых вод в любой точке пласта на расстоянии ρ от нагнетательной трубки при работе одной трубки, работающей в режиме нагнетательной скважины, с учетом того, что расход Q равномерно распределяется между n нагнетательными трубками аналогично уравнению (7) и имеет вид

$$S = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{n \cdot \pi \cdot k} \ln \frac{\rho}{R}} - h_e. \quad (8)$$

Для получения общего уравнения для расчета изменения уровня грунтовых вод в любой точке безнапорного водоносного горизонта при циркуляции после наступления квазиустановившегося движения используем известный метод наложения фильтрационных течений, сложив уравнение (7) и уравнения вида (8) для n нагнетательных трубок. Полученное уравнение имеет вид

$$S = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2\pi \cdot k \cdot n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{R^2}} - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2\pi \cdot k} \ln \frac{r_a^2}{R^2}}, \quad (9)$$

где Q — расход дренажной скважины; r_a — расстояние от точки, в которой определяется понижение, до дренажной скважины; ρ_i — расстояние от точки, в которой определяется понижение, до нагнетательной трубки с номером i ; n — число нагнетательных трубок; R — радиус влияния скважины, принимаемый равным расстоянию от нагнетательной трубки до дренажной скважины; k — коэффициент фильтрации.

Для выполнения практических расчетов удобнее перейти от полярных к прямоугольным координатам с началом в центре дренажной скважины и осью абсцисс, проходящей через n -ую нагнетательную трубку, тогда

$$r_a^2 = x_a^2 + y_a^2; \rho_i^2 = (x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2, \quad (10)$$

где x_a, y_a — координаты точки, в которой определяется изменение уровня; x_i, y_i — координаты нагнетательных трубок.

Учитывая, что

$$x_i = R \cos \alpha; y_i = R \sin \alpha, \quad (11)$$

где α — угол между лучом, проходящим из начала координат через нагнетательную трубку с номером i , и осью абсцисс.

Величина угла α может быть определена по формуле

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{n}. \quad (12)$$

Перепиывая выражение (9) с учетом (10) – (12), получаем

$$S(x_a, y_a) = A - B, \quad (13)$$

$$A = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\left(x_a - R \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{n}\right)^2 + \left(y_a - R \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{n}\right)^2}{R^2}};$$

$$B = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot \ln \frac{x_a^2 + y_a^2}{R^2}}.$$

Уравнение (13) позволяет построить гидродинамическую сетку фильтрации для дренажной скважины, оборудованной затрубной системой реагентной промывки. Примеры построения гидродинамической сетки фильтрации и пьезометрической линии по профилю Ox при четырехтрубной системе представлены на рис. 2 и 3. Анализ гидродинамической сетки показывает, что на периферийных участках зоны кольматации ширина поясов сетки, кривизна и длина линий тока, выходящих из нагнетательных трубок, наибольшие, что свидетельствует о том, что скорость фильтрационного потока вдоль этих линий меньше, чем по

главной линии тока (кратчайшей линии, соединяющей дренажную скважину и нагнетательную трубку). Аналогичная картина наблюдалась и для напорного фильтрационного потока при работе затрубной системы [4]. С учетом того, что скорость выщелачивания пропорциональна скорости фильтрации, периферийные сегменты зоны кольматации, лежащие между нагнетательными трубками, будут выщелачиваться несколько медленнее, чем участки, лежащие между дренажной скважиной и нагнетательной трубкой. Таким образом, чем больше затрубная промывная система содержит нагнетательных трубок, тем лучше охват зоны кольматации потоком реагента и меньше время выщелачивания. Однако из-за появления дополнительных сопротивлений снижается пропускная способность гравийной обсыпки и увеличивается стоимость самой системы промывки. Проведенные теоретические исследования для напорного фильтрационного потока [5] показали, что оптимальное количество нагнетательных трубок находится в диапазоне от 4 до 6, поэтому ввиду близ-

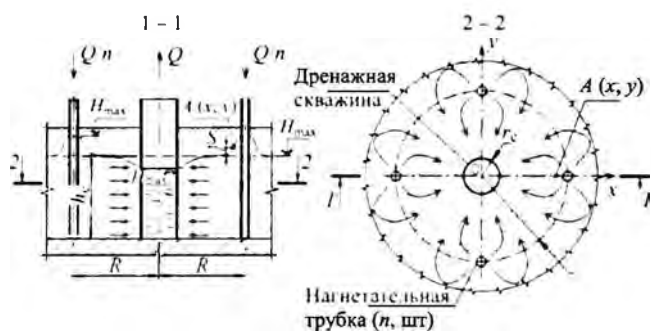


Рис. 1. Расчетная схема циркуляционного движения в системе “дренажная скважина — нагнетательные трубки”

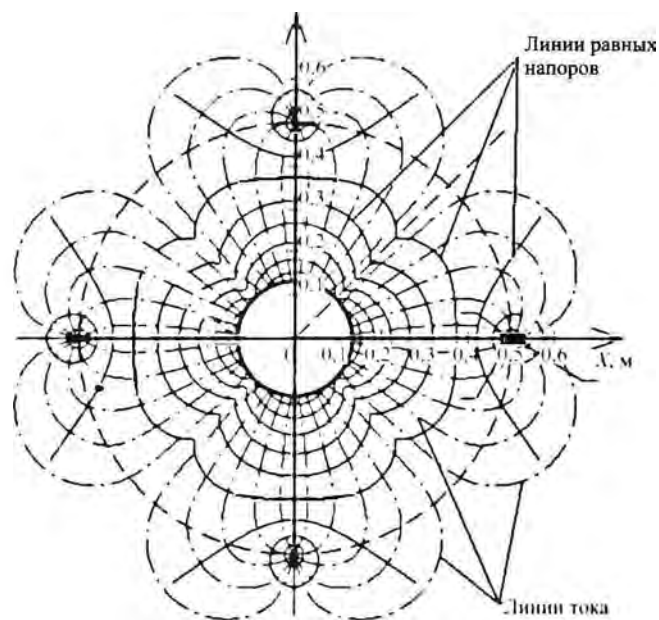


Рис. 2. Гидродинамическая сетка фильтрации при четырехтрубной системе реагентной промывки $n = 4$, $R = 0,5$ м, $h_e = 10$ м, $Q = 0,006$ м³/с, $k = 0,0001$ м/с

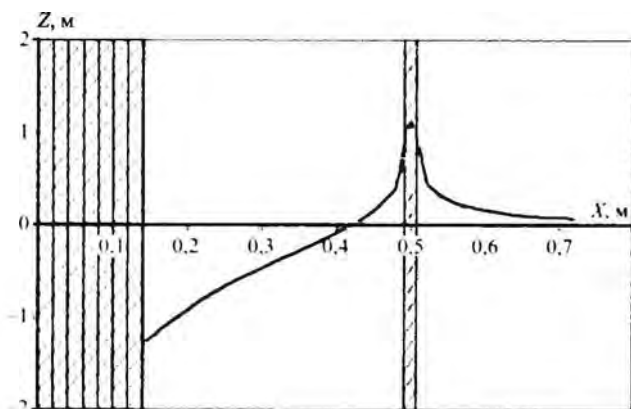
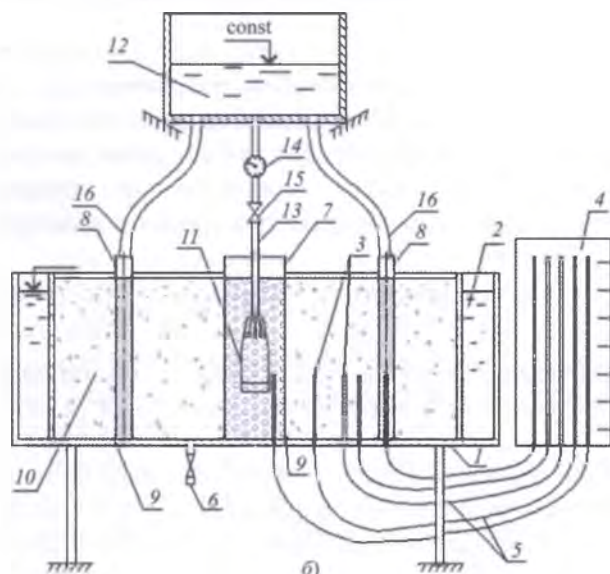


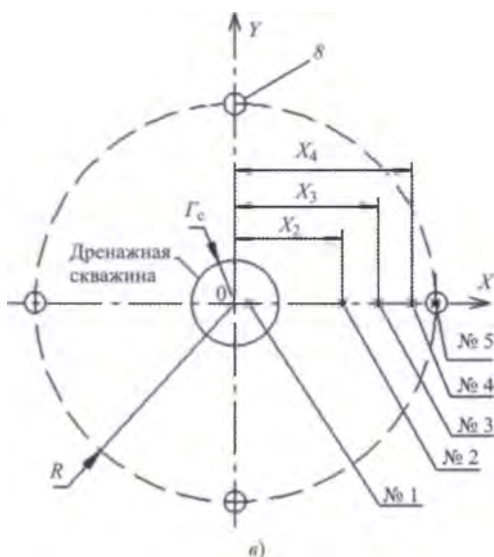
Рис. 3. График изменения напора в профиле Ox между дренажной скважиной и нагнетательной трубкой



а)



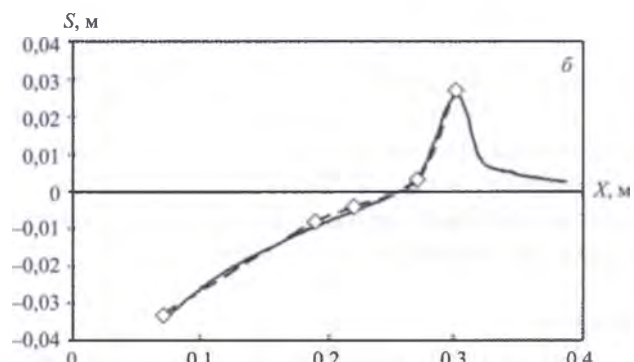
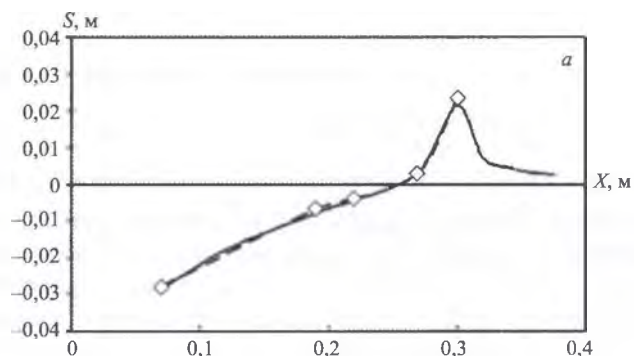
б)



в)

Рис. 4. Экспериментальная установка: а — общий вид; б — разрез; в — схема размещения пьезометров: $R = 0,3$ м; $x_1 = 0,07$ м; $x_2 = 0,19$ м; $x_3 = 0,22$ м; $x_4 = 0,27$ м; $x_5 = 0,3$ м; 1 — фильтрационный лоток; 2 — кольцевой бьеф; 3 — пьезометры; 4 — щит пьезометров; 5 — шланги; 6 — сливной патрубок; 7 — дренажная скважина; 8 — нагнетательные трубки; 9 — уплотнение; 10 — водовмещающий грунт; 11 — насос “Ручеек-1”; 12 — напорный бак; 13 — напорный шланг; 14 — расходомер; 15 — вентиль; 16 — сливные шланги

главной линии тока (рис. 4, в). Фильтр дренажной скважины и нагнетательные трубки имели уплотнения в местах их примыкания к днищу бака. На напорном шланге насоса “Ручеек-1”, помещенном в фильтр, были установлен расходомер и вентиль для регулировки расхода. Фильтр дренажной скважины представ-



— Теоретический график —◇— Экспериментальный график

Рис. 5. Сопоставление экспериментальных исследований и расчетов по (13) при определении напора в профиле ОХ между дренажной скважиной и нагнетательной трубкой в процессе циркуляции жидкости:

а — при $Q = 0,385$ л/с; б — при $Q = 0,460$ л/с

кого сходства гидродинамических сеток для условий напорной и безнапорной фильтрации оптимальное количество циркуляционных трубок для дренажных систем следует считать таким же.

Лабораторные исследования проводились на модели дренажной скважины. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

Экспериментальная установка состояла из радиального фильтрационного лотка диаметром 1,22 м и высотой 0,5 м с кольцевым бьефом. В центр лотка устанавливалась модель фильтра совершенной степени вскрытия пласта дренажной скважины, в прифильтровой зоне которой устанавливались четыре нагнетательные трубки, перфорированные на всю мощность грунтовой засыпки. Фильтрационный лоток засыпали на высоту 0,5 м фильтрующим песчаным грунтом. В опытах использовали кварцевый песок (ТУ РБ 100016844.241 – 2001), как и при исследовании напорной фильтрации [5]. Коэффициент фильтрации песка составлял $k = 0,7$ см/с. В днище бака были встроены водоприемники пьезометров, соединенные с пьезометрическим щитом гибкими шлангами. Пьезометры располагались вдоль

лял собой трубчатый полиэтиленовый каркас с внутренним диаметром 125 мм. Диаметр отверстий в каркасе составлял 12 мм. Отверстия располагались в шахматном порядке. Снаружи каркас обматывали полиэтиленхолстом толщиной $\delta = 7,5$ мм.

В соответствии с методикой эксперимента воду из дренажной скважины с расходом Q подавали насосом в напорный бак, откуда она под действием силы тяжести поступала по сливным шлангам в нагнетательные трубы. Под действием перепада напоров в прифильтровой зоне через 5 – 7 мин после включения насоса формировался установившийся безнапорный фильтрационный поток, признаками которого являлась стабилизация отметок уровней воды в напорном баке и в пьезометрах. На рис. 5 представлены экспериментальные и теоретические графики изменения напора по главной линии тока между дренажной скважиной и нагнетательной трубкой, полученные для двух значений расхода жидкости при $n = 4$ шт., $k = 0,7$ см/с, $R = 0,3$ м, $h_e = 0,46$ м.

Анализ теоретических и опытных данных показал их хорошую сходимость. Небольшое расхождение результатов (7 %) наблюдалось только в прифильтровой зоне циркуляционной трубки, где сказывалось сопротивление ее фильтра. В целом хорошая сходимость результатов расчетов и опытных данных свидетельствует о возможности использования полученной расчетной зависимости (13) для описания поля напоров и расчета скорости фильтрации в любой точке прифильтровой зоны дренажных скважин, оборудованных затрубной системой реагентной промывки, а также для определения конструктивных параметров системы затрубной реагентной промывки.

Выводы

1. Получено выражение для определения гидродинамического напора в любой точке прифильтровой зоны дренажной скважины при её регенерации с помощью затрубной системы циркуляционной реагентной промывки.

2. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали хорошую сходимость результатов, что свидетельствует о возможности использования полученного выражения для построения гидродинамической сетки циркуляционного фильтрационного потока и проектирования затрубной системы промывки дренажных скважин.

Список литературы

1. Милыхкер А. Г. Осадкообразование в скважинах водопонижения. — М.: Энергия, 1971. 103 с.
2. Пат. 9453 Респ. Беларусь, МПКС1, Е21В43 / 00, В03В 03 / 00. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, И. А. Герасименко, Н. И. Крук, И. В. Рытько // Афіцыйны бюл. / цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2006.
3. Ивашечкин В. В., Автушко П. А. Повышение долговечности водозаборных скважин // Наука — образованию, производству, экономике: Материалы 7-й Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 23 – 24 мая 2009 г. в 2 т. / БИТУ. Т. 2. С. 12.
4. Ивашечкин В. В., Автушко П. А. Циркуляционная регенерация водозаборной скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки // Мелиорация. 2010. № 1. С. 70 – 77.
5. Ивашечкин В. В., Автушко П. А., Коледюк Д. А. Экспериментальные исследования скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 2011. № 1. С. 80 – 87.
6. Бочеввер Ф. М., Верегин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. — М.: Госстройиздат, 1961. 200 с.