

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

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

проверить применимость в этой зоне указанных расчетных зависимостей и использовать их для разработки технологии затрубной циркуляционной регенерации.

Поэтому целью настоящей работы являлись экспериментальное исследование параметров фильтрационного потока при работе затрубной циркуляционной системы, сопоставление полученных результатов с теоретическими расчетами, методика которых изложена в [3, 4], а также оценка эффективности регенерации предложенным способом.

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

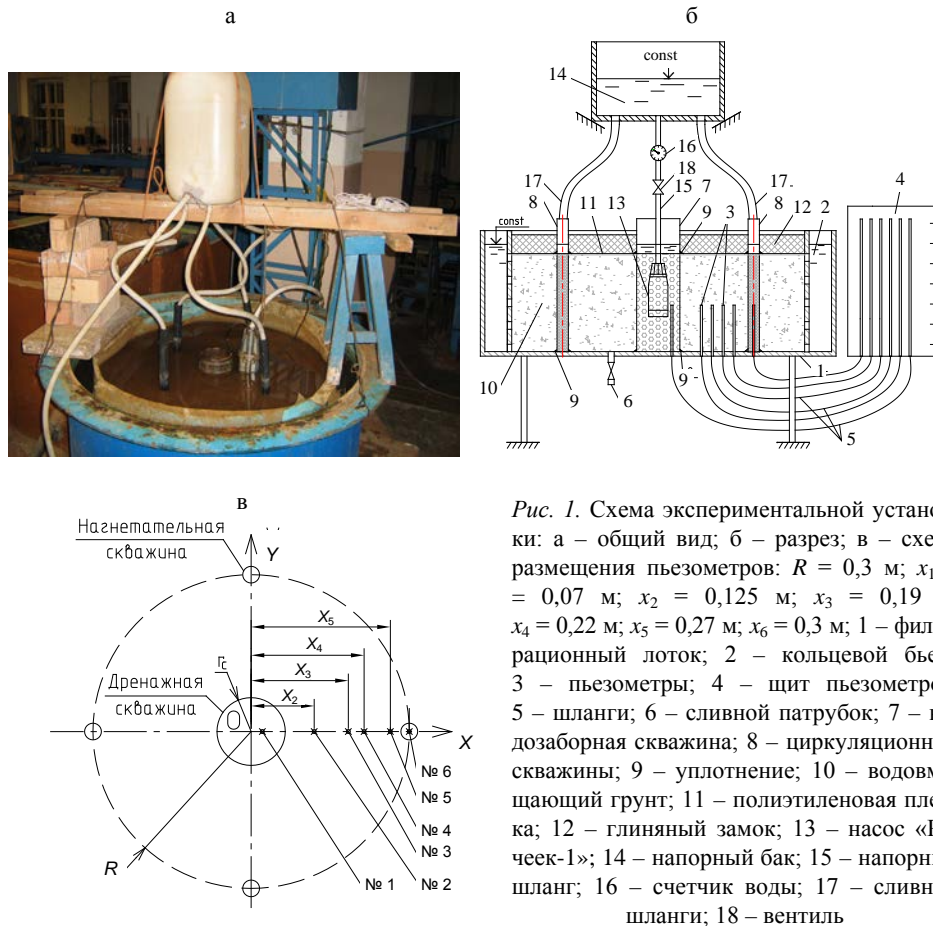


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а – общий вид; б – разрез; в – схема размещения пьезометров: $R = 0,3$ м; $x_1 = 0,07$ м; $x_2 = 0,125$ м; $x_3 = 0,19$ м; $x_4 = 0,22$ м; $x_5 = 0,27$ м; $x_6 = 0,3$ м; 1 – фильтрационный лоток; 2 – кольцевой бьеф; 3 – пьезометры; 4 – щит пьезометров; 5 – шланги; 6 – сливной патрубок; 7 – водозаборная скважина; 8 – циркуляционные скважины; 9 – уплотнение; 10 – водовмещающий грунт; 11 – полиэтиленовая пленка; 12 – глиняный замок; 13 – насос «Ручеек-1»; 14 – напорный бак; 15 – напорный шланг; 16 – счетчик воды; 17 – сливные шланги; 18 – вентиль

Установка состояла из радиального фильтрационного лотка диаметром 1,22 м и высотой 0,5 м с кольцевым бьефом, внутри которого устанавливалась модель фильтра совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины. В прифилтровой зоне водозаборной скважины установлены четыре циркуляционные скважины. Бак засыпан на высоту 0,3 м фильтрующим песчаным грунтом. В днище бака встроены водоприемники пьезометров, которые соединяются с пьезометрическим щитом гибкими шлангами. Пьезометры расположены вдоль главной линии тока. Схема размещения пьезометров представлена на рис. 1а.

В баке предусмотрен слив. Во избежание защемления 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).

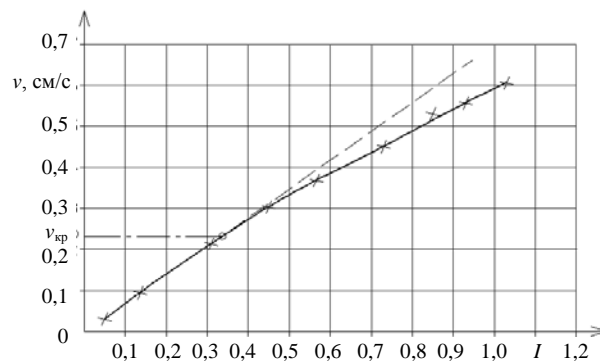


Рис. 2. График зависимости средней скорости фильтрации v от градиента фильтрации I песка при фильтровой зоне

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 напоров 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.

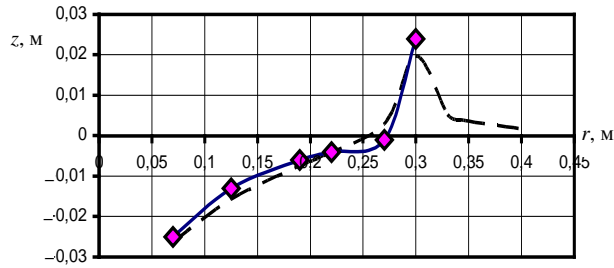


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных исследований и расчетов по (1) при определении напора в профиле Ox между откачной и закачной скважинами в процессе циркуляции жидкости: $n = 4$; $Q = 0,242$ л/с; $k = 0,7$ см/с; $R = 0,3$ м; $m = 0,3$ м; --- – теоретическая кривая; —◆— – опытная кривая

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.

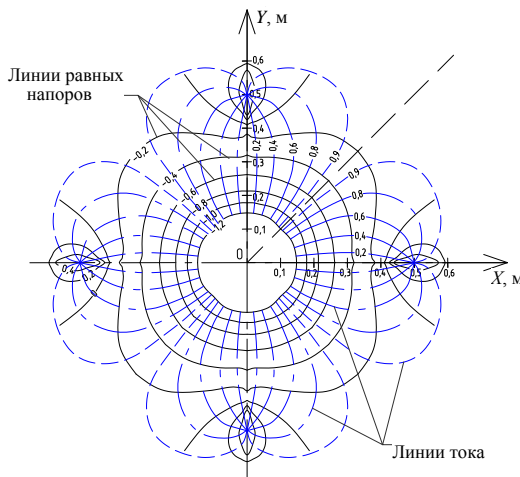


Рис. 4. Гидродинамическая сетка фильтрации при: $n = 4$; $R = 0,5$ м; $km = 10^{-3}$ м²/с; $Q = 0,006$ м³/с

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 $\bar{u} = f(n)$.

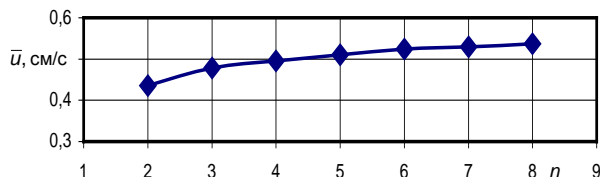


Рис. 5. График зависимости $\bar{u} = f(n)$ при: $R = 0,5$ м; $km = 10^{-3}$ м²/с; $Q = 0,006$ м³/с

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]

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

где 1,2 – коэффициент запаса, который предусматривает 20%-й избыток реагента по отношению к расчетному для создания необходимого рН 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 цементированного 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