

УДК 628.112

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПРИ ЕЕ РЕГЕНЕРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ТРУБЧАТОЙ ЗАФИЛЬТРОВОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫВКИ

Докт. техн. наук ИВАШЕЧКИН В. В.,  
инж. АВТУШКО П. А., канд. техн. наук ШЕЙКО А. М.

*Белорусский национальный технический университет*

Для значительной части водозаборных и дренажных скважин характерна недостаточная начальная производительность из-за внесения кольматирующего материала в прифильтровую зону еще в процессе сооружения скважины при бурении вращательным способом с прямой промывкой глинистым, глинисто-карбонатным и сапропелевым растворами. Остатки бурового раствора могут находиться в прифильтровой зоне на контакте с водовмещающими породами и снижать водопроницаемость пород. В процессе освоения пробуренных скважин для удаления промывочного раствора и размыва глинистой корки может применяться гидравлическая очистка фильтров, включающая прямую промывку зафильтрованного пространства водой через бурильные трубы и рабочую поверхность фильтра, а также обратную промывку по зафильтрованному пространству через водоприемную поверхность и открытый башмак фильтра с одновременной эрлифтной прокачкой [1]. Однако эти методы не всегда обеспечивают качественное освоение скважин после бурения.

Дальнейшее снижение производительности скважин в процессе эксплуатации является следствием постепенного зарастания фильтров и прифильтровых зон различными по физическим свойствам и химическому составу кольматирующими осадками, выпадающими из воды. Для регенерации скважин, закольматированных пластичными или рыхлыми осадками, поддающимися струйному размыву, применяют поинтервальную промывку фильтров водой, нагнетаемой под давлением, а также свабиrowание. Такие гидравлические методы регенерации характеризуются недостаточной эффективностью, так как осуществляются изнутри фильтра. Оттесненный от ствола кольматирующий материал остается в поровом пространстве гравийной обсыпки, водовмещающих пород и в процессе дальнейшей эксплуатации может повторно закупорить прифильтровую зону.

Заслуживает интереса регенерация скважин путем прокачки погружным насосом или эрлифтом с дебитом в 1,6–2 раза больше эксплуатацион-

ного дебита с периодичностью 8–10 месяцев [2]. Прокачки эффективны в скважинах, добывающих подземные воды, вызывающие зарастание фильтров силикатными и алюмосиликатными соединениями ( $Al_2O_3$  или  $SiO_2 \cdot nH_2O > 10$  мг/л). Здесь преобладающий осадок – коагели взаимного осаждения кремнекислоты, окислов алюминия и гидроокислов железа. Фильтры и обсыпки зарастают желе- и пастообразными соединениями, впоследствии приобретающими высокую твердость. Увеличение интервалов прокачек недопустимо в связи с переходом осадков из пластического в твердое состояние. Этот метод регенерации путем прокачки скважины удвоенным расходом по отношению к паспортному чреват созданием высоких скоростей фильтрации, превышающих допустимые скорости, что может привести к нарушению механической и фильтрационной устойчивости водовмещающих пород водоносного горизонта. Достоинство метода – возможность выноса коагулянта, так как промывной поток направлен к фильтру.

На кафедре «Кораблестроение и гидравлика» БНТУ предложено осуществлять освоение новых и регенерацию снизивших свой дебит эксплуатирующихся скважин с помощью трубчатых зафилтровых систем промывки, которые устанавливаются в затрубном пространстве скважины вместе с фильтром и эксплуатационной колонной [3]. В [4] рассмотрена циркуляция жидкости в прифилтровой зоне водозаборной скважины при закачке реагента в нагнетательные трубки и откачке продуктов реакции из скважины при равенстве расходов закачки и откачки, которое необходимо выдерживать во избежание утечек реагента в пласт. Однако применение дорогостоящих реагентов для регенерации фильтров скважин не всегда оправдано. Например, для освоения скважин, пробуренных методом прямой промывки с применением буровых растворов, а также для промывки фильтров скважин, закольматированных пластичными, рыхлыми или пастообразными осадками, поддающимися струйному размыву, более предпочтительным является метод гидродинамической безреагентной зафилтровой промывки, когда в трубчатую зафилтровую систему подается чистая вода. При гидродинамической безреагентной зафилтровой промывке скважин может быть использовано различное соотношение расходов закачки-откачки. Здесь наиболее предпочтителен случай, когда расход откачки превышает расход закачки в трубчатую систему, что предполагает привлечение для промывки дополнительного расхода воды из водоносного пласта. Причем расход воды из пласта не должен быть больше дебита скважины, при котором нарушается суффозионная устойчивость водовмещающих пород пласта, начинается их вынос в гравийную обсыпку и пескование скважины.

Цель работы – теоретические и экспериментальные исследования установившегося движения жидкости в прифилтровых зонах водозаборной и дренажной скважин при их регенерации с помощью трубчатых зафилтровых систем промывки.

**Математическое моделирование установившегося движения жидкости при зафилтровой промывке скважин. Водозаборная скважина в напорном пласте.** Рассмотрим установившуюся напорную фильтрацию жидкости в прифилтровой зоне водозаборной скважины при подаче промывной воды в нагнетательные трубки в процессе откачки воды из скважины (рис. 1).

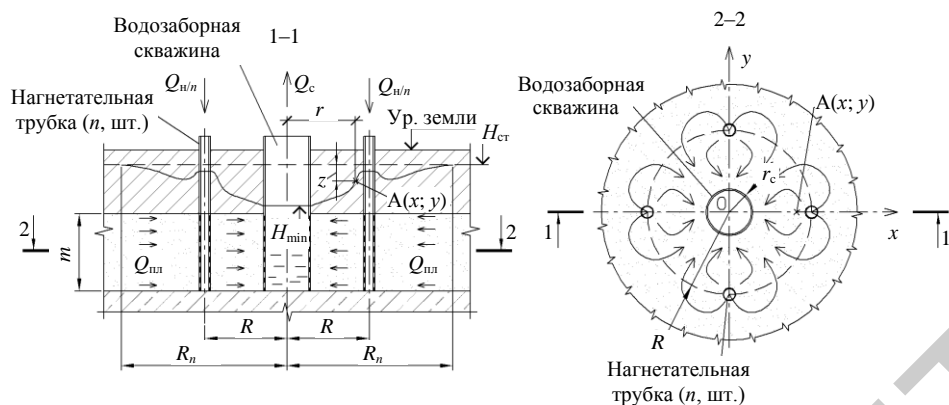


Рис. 1. Расчетная схема заfiltrовывки водозаборной скважины в напорном пласте

Введем обозначения:  $n$  – количество нагнетательных трубок;  $R$  – их расстояния от водозаборной скважины;  $m$  – мощность водоносного пласта;  $k$  и  $k_{\phi}$  – коэффициенты фильтрации пласта и прифилтровой зоны.

Пусть расход, откачиваемый из ствола скважины, превышает суммарный расход воды, подаваемый в нагнетательные трубки. Это значит, что некоторая часть расхода будет забирается из водоносного пласта

$$Q_c = Q_n + Q_{пл}, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – расход воды, откачиваемый из водозаборной скважины;  $Q_n$  – суммарный расход воды, подаваемый в нагнетательные трубки;  $Q_{пл}$  – расход воды, дополнительно отбираемый из пласта.

Используем известный метод наложения фильтрационных течений и получим уравнение для расчета изменения уровня  $S$  в любой точке прифилтровой зоны скважины после установления квазиустановившегося движения. В общем случае понижение уровня воды в любой точке прифилтровой зоны скважины относительно статического уровня будет определяться по следующему уравнению:

$$S = S_o - S_n + S_{пл}, \quad (2)$$

где  $S_o$  – понижение уровня при откачке из водозаборной скважины расхода  $Q_n$ , подаваемого в нагнетательные трубки;  $S_n$  – повышение уровня при закачке в нагнетательные трубки расхода  $Q_n$ ;  $S_{пл}$  – понижение уровня при откачке из водозаборной скважины расхода, дополнительно отбираемого из пласта  $Q_{пл}$ .

Пусть прифилтровая зона снизила свою проницаемость в результате кольматажа. Кольматаж наиболее интенсивно проявляется в непосредственной близости от водозаборной скважины в области  $(R - r_c)$ , где  $r_c$  – радиус фильтра;  $R$  – радиус бурения скважины (радиус внешнего контура гравийной обсыпки, на котором установлены нагнетательные трубки). Таким образом, скважина имеет «кольматационное кольцо» толщиной  $(R - r_c)$  со сниженной проницаемостью и коэффициентом фильтрации  $k_{\phi}$ . Допустим, что за пределами этой области коэффициент фильтрации не изменяется и равен коэффициенту фильтрации пласта  $k$ . Понижение  $S_{пл}$

в скважине при наличии вблизи нее зоны с кольцевой неоднородностью определяется по зависимости [5]

$$S_{\text{пл}} = \frac{Q_{\text{пл}}}{2\pi km} \left[ \ln \frac{R_n}{r} + \zeta \right], \quad (3)$$

где  $R_n$  – радиус влияния водозаборной скважины;  $r$  – расстояние от оси водозаборной скважины до точки, в которой определяется понижение;  $\zeta$  – показатель обобщенного сопротивления, обусловленного кольматажом в зоне  $(R - r_c)$ , определяемый по зависимости [5]

$$\zeta = \left( \frac{k}{k_\phi} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c}. \quad (4)$$

Понижение  $S$  находим с учетом выражений, полученных при теоретическом исследовании циркуляционного движения в прифилтровой зоне скважины, оснащенной трубчатой системой зафилтровой регенерации, при равенстве расходов закачки и откачки [4]. Введем обозначения:

$\beta = \frac{Q_{\text{пл}}}{Q_{\text{н}}}$  и  $\varepsilon = \frac{k_\phi}{k}$ . Тогда с учетом (3) и (4) получим

$$\begin{aligned} S &= \frac{Q_{\text{н}}}{2\pi k_\phi m} \ln \frac{R}{r} - \frac{Q_{\text{н}}}{2\pi k_\phi nm} \sum_{i=1}^n \ln \frac{R}{\rho_i} + \frac{Q_{\text{пл}}}{2\pi km} \left[ \ln \frac{R_n}{r} + \left( \frac{k}{k_\phi} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] = \\ &= \frac{Q_{\text{н}}}{4\pi mk} \left[ \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{R^2}{r^2} - \frac{1}{\varepsilon n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{R^2}{\rho_i^2} + 2\beta \left[ \ln \frac{R_n}{r} + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right] = \\ &= \frac{Q_{\text{н}}}{4\pi mk} \left[ -\ln r^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \rho_i^2 + 2\varepsilon\beta \left[ \ln \frac{R_n}{r} + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right] = \\ &= \frac{Q_{\text{н}}}{4\pi mk} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{r^2} + 2\varepsilon\beta \left[ \ln \frac{R_n}{r} + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right], \quad (5) \end{aligned}$$

где  $\rho_i$  – расстояние от  $i$ -й нагнетательной трубки до точки, в которой определяется понижение.

В декартовых координатах выражение имеет вид

$$\begin{aligned} S(x, y) &= \frac{Q_{\text{н}}}{4\pi mk} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2}{x^2 + y^2} + \right. \\ &\quad \left. + 2\varepsilon\beta \left[ \ln \frac{R_n}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $\alpha_i = \frac{2\pi(i-1)}{n}$ ,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  – расстояние от водозаборной скважины радиуса  $r_c$  до точки, в которой определяется понижение;  $\rho_i =$

$= \sqrt{(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2}$  – расстояние от  $i$ -й циркуляционной трубки до точки, в которой определяется понижение.

Общий вид гидродинамической сетки, построенной по формуле (6), представлен на рис. 2.

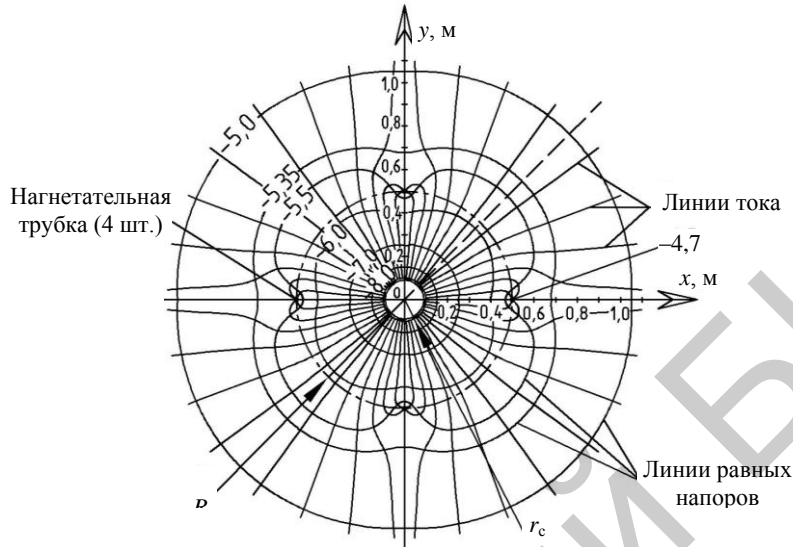


Рис. 2. Гидродинамическая сетка фильтрации:  $n = 4$ ;  $R = 0,5$  м;  $m = 10$  м;  $Q_n = Q_{пл} = 0,006$  м<sup>3</sup>/с;  $k_{\phi} = k = 0,0001$  м/с;  $R_n = 200$  м;  $r_c = 0,1$  м;  $\beta = 1,0$ ;  $\varepsilon = 1,0$

**Дренажная скважина в безнапорном пласте.** Расчетная схема установившейся безнапорной фильтрации при закачке-откачке воды в системе «нагнетательные трубки – дренажная скважина» представлена на рис. 3.

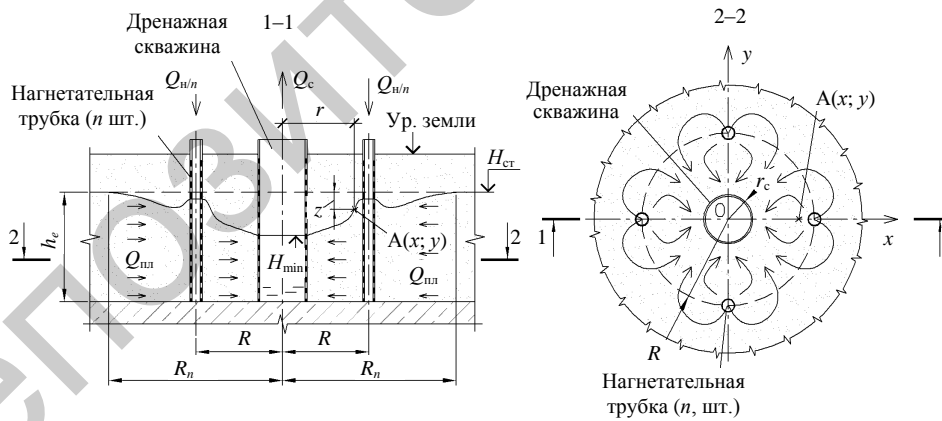


Рис. 3. Расчетная схема заfiltrовой промывки дренажной скважины в безнапорном пласте

Для этого случая также справедливы выражения (1), (2). Уравнение для определения понижения уровня грунтовых вод  $S_{пл}$  в любой точке пласта, вызванного работой дренажной скважины при заборе воды из пласта в количестве  $Q_{пл}$ , имеет вид

$$S_{\text{пл}} = h_e - h = \left[ h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q_{\text{пл}}}{\pi k} \left( \ln \frac{R_n}{r} + \zeta \right)} \right], \quad (7)$$

где  $h_e$  – статическая глубина грунтовых вод;  $h$  – мощность потока грунтовых вод в точке пласта с координатой  $r$ .

Тогда понижение в точке пласта согласно (2) с учетом (4) равно

$$S = \sqrt{h_e^2 + \frac{Q_n}{2\pi k_\phi n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{\rho_i^2}{R^2}} - \sqrt{h_e^2 + \frac{Q_n}{2\pi k_\phi} \ln \frac{r^2}{R^2}} + \left[ h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q_{\text{пл}}}{\pi k} \left[ \ln \frac{R_n}{r} + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right]} \right], \quad (8)$$

где  $r$  – расстояние от точки, в которой определяется понижение, до оси дренажной скважины.

В декартовых координатах выражение (8) имеет вид

$$S(x, y) = \sqrt{h_e^2 + \frac{\bar{Q}}{n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{(x - R \cos \alpha_i)^2 + (y - R \sin \alpha_i)^2}{R^2}} - \sqrt{h_e^2 + \bar{Q} \ln \frac{x^2 + y^2}{R^2}} + \left[ h_e - \sqrt{h_e^2 - 2\varepsilon\beta\bar{Q} \left[ \ln \frac{R_n}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_c} \right]} \right], \quad (9)$$

где  $\alpha_i = \frac{2\pi(i-1)}{n}$ ;  $\bar{Q} = \frac{Q_n}{2\pi k_\phi}$ .

Общий вид гидродинамической сетки, построенной по формуле (9), представлен на рис. 4.

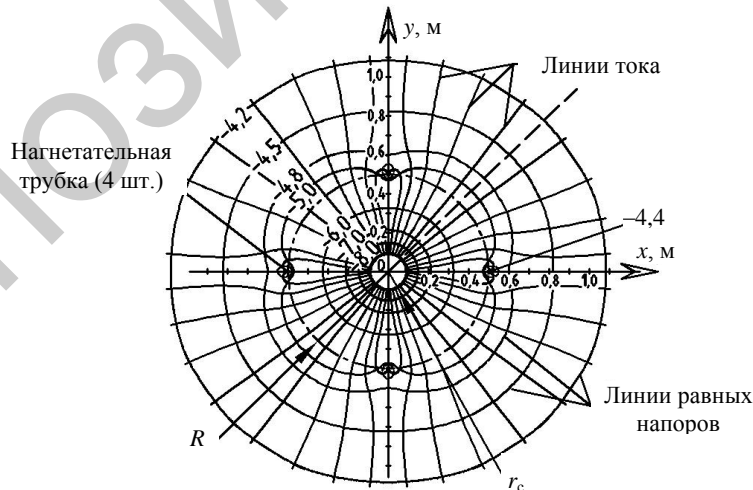


Рис. 4. Гидродинамическая сетка фильтрации для дренажной скважины:  
 $n = 4$ ;  $R = 0,5$  м;  $h_e = 10$  м;  $Q_n = Q_{\text{пл}} = 0,006$  м<sup>3</sup>/с;  $k_\phi = k = 0,0001$  м/с;  $R_n = 200$  м;  
 $r_c = 0,1$  м;  $\beta = 1,0$ ;  $\varepsilon = 1,0$

По гидродинамическим сеткам (рис. 2, 4) можно найти местную скорость фильтрации в любой точке прифилтровой зоны. Вблизи фильтра скважины линии равных напоров представляют собой концентрические окружности, расстояние между которыми убывает по мере приближения к наружной поверхности фильтра, что указывает на существенный рост градиентов напора. Одновременно возрастает средняя скорость в этих цилиндрических сечениях, совпадающих с линиями равных напоров. Ее находят как суммарный расход, деленный на площадь соответствующего сечения. По сетке можно определить теоретическое значение градиентов фильтрации и сравнить их с допустимыми средними градиентами фильтрационного потока  $I_{\text{доп}}$ , при превышении которых начинается суффозия грунта [6].

**Физическое моделирование установившегося движения жидкости при зафилтровой промывке скважин. Водозаборная скважина в напорном пласте.** Физическое моделирование осуществляли на лабораторной установке, представленной на рис. 5.

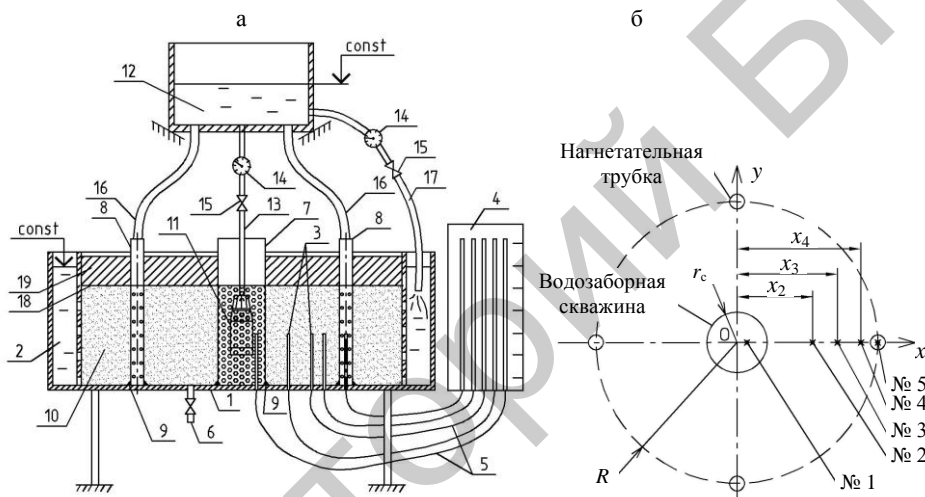


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: а – разрез; б – схема размещения пьезометров ( $R = 0,3$  м;  $x_1 = 0,07$  м;  $x_2 = 0,125$  м;  $x_3 = 0,19$  м;  $x_4 = 0,22$  м;  $x_5 = 0,27$  м;  $x_6 = 0,3$  м): 1 – фильтрационный лоток; 2 – кольцевой бьеф; 3 – водоприемники пьезометров; 4 – щит пьезометров; 5 – шланги; 6 – сливной патрубок; 7 – модель водозаборной скважины; 8 – нагнетательные трубки; 9 – уплотнение; 10 – водовмещающий грунт; 11 – насос; 12 – напорный бак; 13 – напорный шланг; 14 – расходомер; 15 – вентиль; 16 – сливные шланги; 17 – отводящий шланг; 18 – полиэтиленовая пленка; 19 – глиняный замок

Установка состояла из радиального фильтрационного лотка диаметром 1,22 м и высотой 0,5 м с кольцевым бьефом, внутри которого устанавливали модель фильтра совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины. 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 обматывали полиэтиленхолстом толщиной  $\delta = 7,5$  мм. В опытах использовали кварцевый песок (ТУ РБ 100016844.241–2001). На приборе Дарси определили коэффициент фильтрации песка, который составил  $k = 0,7$  см/с, и критическую скорость фильтрации  $v_{\text{кр}} = 0,23$  см/с, при которой происходит нарушение закона Дарси [7].

В прифльтровой зоне водозаборной скважины установлены четыре нагнетательные трубки. Бак засыпан на высоту 0,35 м фильтрующим песчаным грунтом 10. В днище бака встроены водоприемники пьезометров, которые соединяются с пьезометрическим щитом гибкими шлангами. Пьезометры расположены вдоль главной линии тока, соединяющей ось модели водозаборной скважины и нагнетательной трубки. Схема размещения пьезометров представлена на рис. 5б. В баке предусмотрен сливной патрубков. Во избежание зацемявления воздуха, грунт закладывали в воду с послойным трамбованием. Для обеспечения условий напорной фильтрации в грунте 10 при циркуляции на его поверхности была уложена полиэтиленовая пленка с глиняным замком. Таким образом, модель напорного пласта была мощностью  $m = 0,35$  м. Модель скважины и нагнетательные трубки имели нижние и верхние уплотнения 9 в местах их примыкания к днищу бака и на контакте с полиэтиленовой пленкой. В модель водозаборной скважины помещали насос, который откачивал из нее воду в напорный бак. На напорном шланге насоса установили расходомер и вентиль для регулировки расхода. Из бака в нагнетательные трубки были подведены сливные шланги. Часть воды, нагнетаемой насосом в напорный бак, отводилась по отводящему шлангу в кольцевой бьеф в зону питания модели пласта, другая часть подавалась в нагнетательные трубки. Уровень воды в напорном баке поддерживали в течение опыта постоянным. Расходы воды в напорном и отводящем шлангах фиксировали при помощи счетчика воды СХВ 15 (ГОСТ Р 50601–93).

Установка работала следующим образом. Вода насосом забиралась из скважины с расходом  $Q_c$ , который фиксировался водомером, и подавалась в напорный бак. Расход  $Q_{пл}$ , подаваемый по отводящему шлангу в кольцевой бьеф, также фиксировался водомером. Так как уровень в напорном баке поддерживался постоянным, расход  $Q_n$ , подаваемый в нагнетательные трубки, определяли как разность  $Q_n = Q_c - Q_{пл}$ . Давление в пласте при фильтрации регистрировали с помощью пьезометров.

С целью проверки правомерности применения полученных зависимостей (5) и (8) для описания поля напоров при зафльтровой 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  $Ox$  представлено на рис. 6.

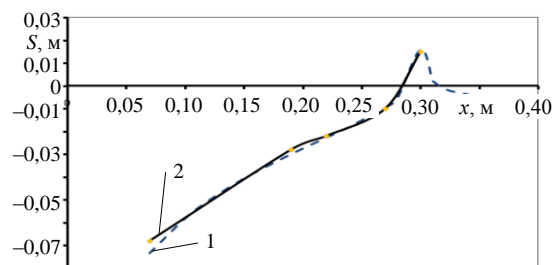


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных исследований и расчетов при определении напора в профиле  $Ox$  между водозаборной скважиной и нагнетательной трубкой в процессе зафльтровой промывки (напорное движение):  $Q_n = 0,235$  л/с;  $Q_{пл} = 0,156$  л/с;  $Q_c = 0,391$  л/с;  $m = 0,35$  м;  $R = 0,3$  м;  $R_n = 0,6$  м;  $\beta = 0,664$ ;  $k = k_\phi = 0,007$  м/с; 1 – теория; 2 – эксперимент



Анализ теоретических и опытных данных показал, что относительное отклонение напоров вдоль главной линии тока не превышает 8 %. Это свидетельствует о возможности использования расчетных зависимостей (5) и (6) для построения поля напоров и определения скоростей и градиентов фильтрации в прифильтровой зоне водозаборных скважин при их промывке с целью назначения необходимых режимов регенерации.

**Дренажная скважина в безнапорном пласте.** Физическое моделирование осуществляли на лабораторной установке, представленной на рис. 5, где полиэтиленовую пленку и глиняный замок удаляли, а это пространство заполняли тем же грунтом, что и грунт водоносного горизонта. Это позволяло переоборудовать напорный водоносный горизонт в безнапорный. Методику лабораторных исследований использовали ту же. Сопоставление результатов опытов и расчетов по определению напора вдоль главной линии тока  $Ox$  дренажной скважины представлено на рис. 7.

Анализ теоретических и опытных данных показал, что относительное отклонение напоров вдоль главной линии тока не превышает 8 %. Это свидетельствует о возможности использования расчетных зависимостей (5) и (6) для построения поля напоров и определения скоростей и градиентов фильтрации в прифильтровой зоне дренажных скважин в безнапорном пласте при их промывке с целью назначения необходимых режимов регенерации.

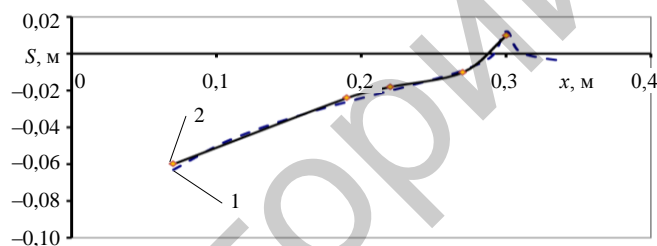


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных исследований и расчетов при определении напора в профиле  $Ox$  между дренажной скважиной и нагнетательной трубкой в процессе зафильтровой промывки (безнапорное движение):  $Q_n = 0,235$  л/с;  $Q_{пл} = 0,179$  л/с;  $Q_c = 0,414$  л/с;  $h_e = 0,46$  м;  $R = 0,3$  м;  $R_n = 0,6$  м;  $\beta = 0,762$ ;  $k = 0,007$  м/с;  
1 – теория; 2 – эксперимент

Анализ распределения напоров и скоростей в прифильтровой зоне водозаборной и дренажной скважин показывает, что применение трубчатой системы зафильтровой промывки позволяет существенно увеличить местные скорости фильтрации и соответственно градиенты фильтрации непосредственно в прифильтровой зоне скважин, где находится гравийная обсыпка, загрязняемая с течением времени осадками и нуждающаяся в периодической промывке. Это сводит к минимуму возможность суффозионного выноса грунта из водовмещающих пород пласта, где градиенты фильтрации будут меньше допустимых. При кольматации гравийной обсыпки мелким песком, оставшимся в открытом стволе скважины после бурения и попавшим в гравийную обсыпку при ее гравитационной загрузке в зафильтровое пространство, ее можно рассматривать как крупный песок. При кольматации обсыпки глинистыми частицами и пастообразными железистыми соединениями ее можно рассматривать как супесь. В справоч-

ной литературе приведены значения допускаемых средних градиентов фильтрационного потока для супеси в диапазоне  $I_{\text{доп}} = 0,55-0,85$ , а для крупного песка –  $0,9-1,1$  [6, с. 151]. Таким образом, при назначении режимов промывки необходимо брать такое соотношение расходов  $Q_n, Q_{\text{пл}}, Q_c$ , при котором расчетные значения градиентов фильтрационного потока  $I_{\text{расч}}$  в загрязненной гравийной обсыпке реанимируемой скважины превысят допустимые градиенты фильтрации  $I_{\text{доп}}$ , т. е. будет выполняться условие  $I_{\text{расч}} > I_{\text{доп}}$ . В этом случае в загрязненной осадками или мелким песком гравийной обсыпке начнется контролируемая суффозия, обеспечивающая вынос загрязнений за пределы скважины.

## ВЫВОДЫ

1. В результате теоретических исследований на основе метода наложения фильтрационных течений получены зависимости для описания установившегося движения в прифильтровых зонах водозаборной и дренажных скважин при их безреагентной промывке с помощью трубчатых зафильтровых систем регенерации. Предложенные зависимости позволяют определить напор и скорость жидкости в любой точке промываемой прифильтровой зоны с постоянной и измененной проницаемостью, что дает возможность определить градиенты фильтрации и обосновать необходимое соотношение расходов  $Q_n, Q_{\text{пл}}, Q_c$ , обеспечивающее удаление загрязнений.

2. Проведенные экспериментальные исследования изменения напоров вдоль главной линии тока, соединяющей оси скважины и одной из нагнетательных трубок при установившемся движении в прифильтровой зоне моделей водозаборной и дренажной скважин, показали, что относительное отклонение результатов теоретических и экспериментальных исследований для прифильтровой зоны с постоянной проницаемостью не превышает 8 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду: справ. / Д. Н. Башкатов [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 268 с.
2. Морозов, Э. А. Справочник по эксплуатации и ремонту водозаборных скважин / Э. А. Морозов, А. В. Стецюк. – Киев: Будівельник, 1984. – 96 с.
3. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении: пат. 9453 Респ. Беларусь, МПКС1, Е21В43/00, В03В 03/00 / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, И. А. Герасименко, Н. И. Крук, И. В. Рытько; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а 20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 30.06.2005 // Афіцыйны бюл. / Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 110.
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. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. – М.: Стройиздат, 1990. – 256 с.
6. Гидротехнические сооружения (справочник проектировщика) / Г. В. Железняков [и др.]; под общ. ред. В. П. Недриги. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
7. Ивашечкин, В. В. Экспериментальные исследования скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко, Д. М. Коледюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 1. – С. 80–87.

Представлена кафедрой  
кораблестроения и гидравлики

Поступила 31.01.2013