

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫВКИ ФИЛЬТРОВ СКВАЖИН С ЗАТРУБНЫМИ СИСТЕМАМИ РЕГЕНЕРАЦИИ

В.В. Изашечкин, доктор технических наук

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Ключевые слова: скважина, затрубная система регенерации, кольматант, промывка

Введение

Значительная часть водозаборных скважин характеризуется недостаточной начальной производительностью из-за внесения кольматирующего материала в прифилтровую зону при бурении вращательным способом с прямой промывкой глинистым, глинисто-карбонатным или сапропелевым растворами [1]. Остатки бурового раствора могут оставаться в прифилтровой зоне на контакте с водовмещающими породами и существенно снижать их водопрпускную способность. Существующие методы освоения скважин далеко не всегда обеспечивают качественное удаление искусственно образованной глинистой корки. Дальнейшее снижение производительности скважин в процессе эксплуатации является следствием постепенного зарастания фильтров и прифилтровых зон кольматирующими осадками, выпадающими из воды [2,3].

Для повышения ремонтпригодности и продления срока службы водозаборов подземных вод была разработана конструкция скважины с затрубной системой регенерации [4]. Основной особенностью такой скважины является размещение еще на этапе бурения в ее прифилтровой зоне нескольких циркуляционных трубок малого диаметра, равноудаленных от центра скважины. Такое техническое решение обеспечивает дополнительный доступ через трубки в прифилтровую зону, что существенно повышает эффективность ведения ремонтных работ по декольматации гравийного фильтра. При гидродинамической безреагентной промывке таких скважин в циркуляционные трубки под давлением можно непрерывно подавать чистую воду и одновременно из ствола скважины производить откачку, причем для более эффективной промывки расход откачки должен превышать расход закачки [5]. Таким образом, в гравийной обсыпке искусственно создают условия для фильтрационного выноса (суффозии) кольматирующих частиц.

Целью настоящей работы являются лабораторные и натурные исследования эффективности гидродинамической промывки гравийной обсыпки скважин с помощью затрубной системы регенерации.

Основная часть

Лабораторные исследования

В результате проведенных теоретических исследований процесса гидродинамической промывки скважин с затрубной системой регенерации, были получены выражения, описывающие закономерности движения фильтрационного потока в прифильтровой зоне [5]. При известных расходах откачки и закачки, по полученным выражениям можно построить гидродинамическую сетку в кольцевой зоне между циркуляционными трубками и наружной стенкой фильтра (кольматационном кольце) и по сетке определить местную скорость фильтрации в любой точке кольцевой зоны. Вблизи фильтра, где линии равных напоров представляют собой концентрические окружности, местные скорости равны средним скоростям в этих цилиндрических сечениях, поэтому их находят как суммарный расход, деленный на площадь соответствующего сечения.

Так как при гидродинамической промывке создают условия для фильтрационного выноса (суффозии) кольматирующих частиц, по гидродинамической сетке можно определить теоретическое значение градиента фильтрации I , а затем сравнить его с допускаемым средним градиентом фильтрационного потока $I_{доп}$, при котором начинается перемещение кольматирующих частиц в порах скелета грунта и их вынос из затрубного пространства в ствол скважины. Гидромеханическое условие возникновения внутренней суффозии [6]:

$$I > I_{доп} \quad (1)$$

Гравийную обсыпку, закольматированную глинистыми частицами или пастообразными железистыми соединениями, можно рассматривать как супесь. При кольматации обсыпки мелким песком, попавшим в нее при обустройстве фильтра, ее можно рассматривать как крупный песок. Значения допускаемых средних градиентов фильтрационного потока для супеси – $I_{доп} = (0,55-0,85)$, а для крупного песка – $I_{доп} = (0,9-1,1)$ [7, стр. 151].

Необходимым условием возникновения объемной суффозии также является возможность перемещения мелких «незащемленных» частиц в поровых каналах грунта [6]:

$$d_m > d_0 \quad (2)$$

где d_m - размер мелких частиц (заполнителя грунта); d_0 - расчетный поперечник поровых каналов в грунте.

Расчетный поперечник d_0 поровых каналов примерно равен просвету в местах их сужений и может быть принят в качестве гидравлически эквивалентного диаметра поровых каналов. Если известны пористость n и коэффициент ламинарной фильтрации грунта k_f , вязкость фильтрующей жидкости ν , то d_0 можно вычислить по формуле [6]:

$$d_0 = 6,1 \sqrt{\frac{\nu}{\varphi \times n \times g}} k_f \quad (3)$$

Входящий в выражение (3) коэффициент формы сечений поровых каналов в грунте $\varphi = 0,45 (1 + 0,306 B)$, где B - балл окатанности по пятибалльной шкале А. В. Хабакова [8].

Для экспериментального исследования процесса промывки закольматированного грунта была проведена серия опытов на вертикальном фильтрационно-суффозионном приборе (рис.1).

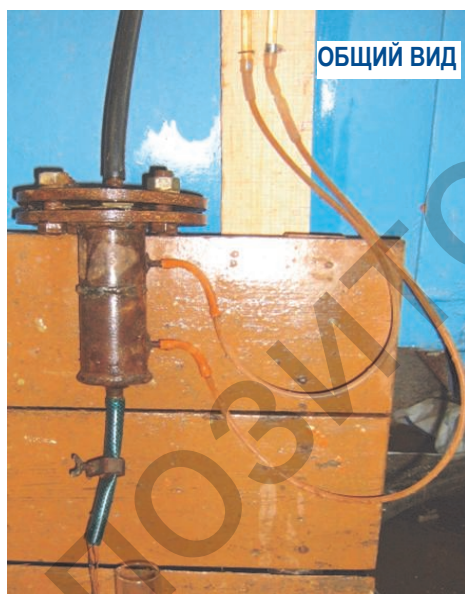
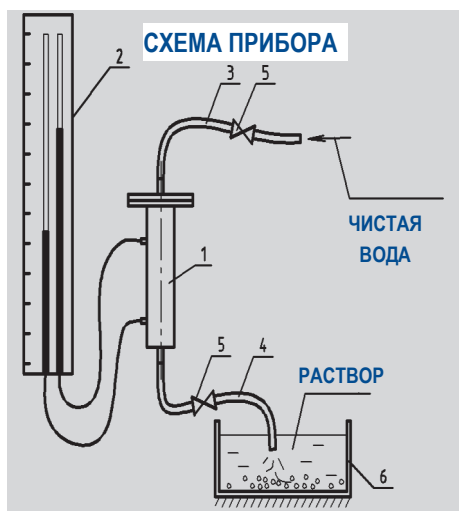


Рисунок 1 - Вертикальный фильтрационно-суффозионный прибор

- 1 – рабочая камера;
- 2 – щит пьезометров;
- 3 – подводящий шланг;
- 4 – отводящий шланг;
- 5 – вентили;
- 6 – емкость

Прибор состоял из цилиндрической рабочей камеры 1 с крышкой для загрузки грунта. Потери напора определяли по пьезометрам, выведенным на щит 2. Вода в камеру подавалась из напорного бака (на рисунке не показан).

В качестве грунта гравийной обсыпки применялся крупнозернистый песок, соответствующий ТУ РБ 100016844.241-2001 «Песок кварцевый фильтрующий» с диаметром частиц 1-1,8мм. В качестве кольматанта (мелкозема) использовался осадок скорых песчаных фильтров станции обезжелезивания «Острова», следующего химического состава: 28,55% - Fe_2O_3 ; 16,2% - SiO_2 ; 13,64% - CaO ; 24,83% - потери при прокаливании. Осадок представлял собой мелкодисперсный порошок коричневого цвета.

При назначении размеров рабочей камеры (рис.1) учитывалось, что на величину гидравлического сопротивления образца грунта могут влиять стенки камеры. Так называемый «эффект пристенной фильтрации», обусловленный наличием вблизи стенок крупных пор, становится пренебрежимо малым при отношении диаметра рабочей камеры к диаметру зерен разнозернистых грунтов $D_k/d_0 > 200$, должно также выполняться условие - $D_k/d_{\text{макс}} > 4$ [6].

На приборе Дарси определяли коэффициент фильтрации «Песка кварцевого фильтрующего», который составил $k_n = 0,5$ см/с. Затем по формуле (3) находили поперечник поровых каналов d_0 при пористости $n = 0,4$; $v = 0,01$ см²/с и $j = 0,75$ (частицы средней ока-

танности), который составил $d_0=0,025\text{см}$. Диаметр рабочей камеры прибора был принят равным $D_k=54\text{ мм}$, что удовлетворяет приведенным выше условиям ($D_k/d_0=54/0,25=216 > 200$ и $D_k/d_{\text{макс}}=54/1,8=30 > 4$) как для чистого песка ($k_n=0,5\text{ см/с}$), так и во всем диапазоне частично закольматированных песков, у которых коэффициент фильтрации меньше. Высота камеры была принята равной $0,2\text{ м}$, а расстояние между пьезометрами $l=8,5\text{ см}$ (рис. 1).

Методика экспериментов. Осадок и кварцевый песок перемешивали в пропорции 1:4, укладывали в прибор отдельными слоями с легким уплотнением путем трамбования, замачивали водой, воздух из грунта удаляли через пьезометры. Измерялся объемным способом стабильный расход воды Q , профильтровавшейся через грунт при некоторых потерях напора h , определенных как разность показаний пьезометров в данный момент времени t . Определяли среднюю скорость фильтрации v , и одновременно, по потерям напора h рассчитывали градиенты напора l_t на участке испытываемого образца. Затем по формуле Дарси вычисляли текущий коэффициент фильтрации k_t в момент времени t , т.е. $k_t=v/l_t$.

На рис. 2 представлен график зависимости $k_t=f(t)$ при промывке грунта водой с постоянной скоростью фильтрации $v=0,87\text{ см/с}$.

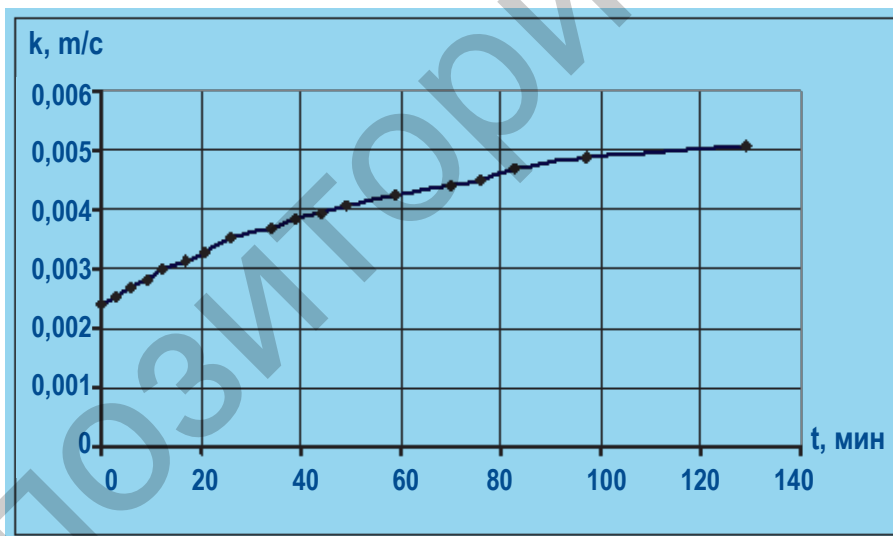


Рисунок 2 – Экспериментальный график изменения коэффициента фильтрации грунта k от времени промывки t при $v=0,87\text{ см/с}$

Из графика следует (рис. 2), что в процессе промывки грунта с постоянной скоростью фильтрации $v=0,87\text{ см/с}$ и градиентами фильтрации $l=1,72-3,63$, превышающими допустимые градиенты $l_{\text{доп}}$ для песков и супесей, наблюдался постепенный суффозионный вынос осадка, причем интенсивность выноса в процессе промывки постепенно снижалась. Через $T=129$ минут после начала опыта было достигнуто значение коэффициента филь-

рации, близкое к первоначальному ($k_0=0,5$ м/с). Анализ качества промывки показал, что в извлеченной из рабочей камеры пробе содержится невымытый кольматант, следовательно степень отмывки грунта не достигла 100%). Продолжительность промывки при указанных режимах составила более 2 часов, что недостаточно технологично в промышленной условиях. Это потребовало проведения дополнительных исследований с более высокими скоростями фильтрации.

Осадок и кварцевый песок перемешивали в объемных пропорциях 1:14, 1:10, 1:7, 1:6 и 1:5. Определяли значения коэффициентов фильтрации k_f проб грунта и промывных скоростей u_n , при которых достигалась проницаемость грунта, близкая к первоначальной за относительно короткий промежуток времени. Скорость фильтрации постепенно увеличивали до прекращения выноса осадка. Строили график зависимости промывной скорости u_n от начальной относительной проницаемости кварцевого песка k_f/k_n (рис.3).

Анализ результатов экспериментов показал, что величина промывной скорости фильтрации возрастает с увеличением загрязненности грунта по нелинейной зависимости. Установлено, что для эффективной затрубной промывки закольматированного рыхлым железистым осадком крупнозернистого песка при снижении его проницаемости на 20 - 40 % относительно первоначальной, необходимы скорости промывки диапазоне от 11 до 20 мм/с.

Натурные исследования

Исследования проводились на водозаборной скважине №2/2011 с затрубной системой регенерации д. Узла Мядельского района. В затрубном пространстве скважины установлены 4 циркуляционные трубки на расстоянии 6 см от фильтра скважины. Трубки имели перфорированную фильтровую часть из полиэтиленовой трубы ($d=20$ мм). Геологотехнический разрез скважины представлен на рис. 4а.

Скважина была пробурена роторным способом с прямой промывкой сапропелевым раствором. При сдаче ее в эксплуатацию дебит составил всего 2 м³/ч при понижении $S = 19,5$ м (статический и динамический уровни соответственно 14,5 м и 34 м). Параметры скважины оказались существенно ниже проектных. Обследованием установлено, что в рабочем состоянии находилось 4,5 м фильтра в интервале 34-38,5 м, а нижняя часть фильтра (38,5-43)м - занесена песком.

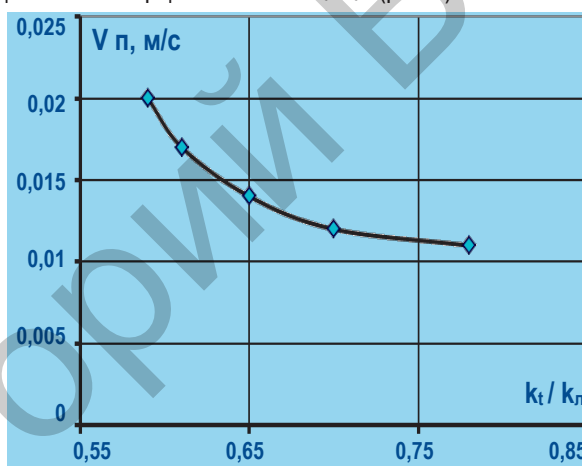


Рисунок 3 - Зависимость промывной скорости v_n от начальной относительной проницаемости k_f/k_n грунта

МАСШТАБ, М	№ СЛОЯ	ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНДЕКС	ЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОРОД по буримости/ по устойчивости	ГЛУБИНА, М		ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ И КОНСТРУКЦИЯ СКВАЖИНЫ Д. УЗЛА МЯДЕЛЬСКОГО РАЙОНА	ДИАМЕТР ДОЛОТА, ММ Интервал бурения, м	ДИАМЕТР КОЛОННЫ, М Глубина установки, м		
				ОТ	ДО					
2 4	1	g III pz	Песок желтый сухой (II/II)	0	4		495 / (0-9)	426 / (0-9)		
5 6 8	2	g III pz	Гравий серый (IV/II)	4	8					
10 12 14 16 18	3	g III pz	Суглинок бурый с гравием и галькой (III/II)	8	18					
22 24 26 27	4	g III pz	Песок желтый разнотернистый (II/II)	18	27					
28 29 30 32	5	g III pz	Супесь (II/II)	27	32					
33 34 35 36	6	g III pz	Суглинок с гравием (III/II)	32	34				219 / (0-34) 168 / (34-43)	
38 40 42 44 46 48 50 51	7	f, lg II, sz g III pz	Песок разнотернистый водоносный (II-II)	34	45				168 / 43	
52 54 56 60	8	g II pz	Переслаивание суглинков, глин, песков (II-II)	45	60				394 / (9-52)	168 / 52
62 64 68 70	9	g II pz	Супесь (II/II)	60	70				151 / (0-70)	

Рисунок 4а – Схема геологического разреза

Выяснилось, что ее освоение и прокачка были выполнены некачественно, поэтому в прифилтровой зоне скважины осталось значительное количество мелкого песка и сапропелевого раствора.

Целью гидравлических испытаний затрубной системы регенерации являлось определение характеристик водопоглощения одной отдельно взятой циркуляционной трубки, а также всех трубок одновременно при закачке в них воды. При отключенном глубинном насосе скважины №2/2011 из водопровода д. Узла поочередно в каждую из четырех циркуляционных трубок, а затем во все трубки одновременно подавалась под давлением вода. На закачной трубе были установлены: вентиль, манометр (0-0,6) МПа и счетчик воды (рис. 4б).



Рисунок 4б – Устье скважины с обвязкой при закачке воды в четыре циркуляционные трубки.

Напор H нагнетаемой в трубку воды определяли по формуле :

$$H = h_{ст} + h_{ман} \quad (4)$$

где $h_{ст}$ - расстояние от оси манометра до статического уровня воды в трубке, $h_{ст}=14,5$ м; $h_{ман}$ - показание манометра в метрах водяного столба.

Расход закачки Q определяли по показанию счетчика воды, разделив его на время опыта. Полученные зависимости $Q = f(H)$ (рис. 5) в испытуемом диапазоне расходов имели вид прямых линий и были описаны линейными функциями вида:

$$Q = aH \quad (5)$$

где a - параметр уравнения, учитывающий проницаемость гравийной обсыпки и потери напора в нагнетательной трубке, л/(с·м).

$Q, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

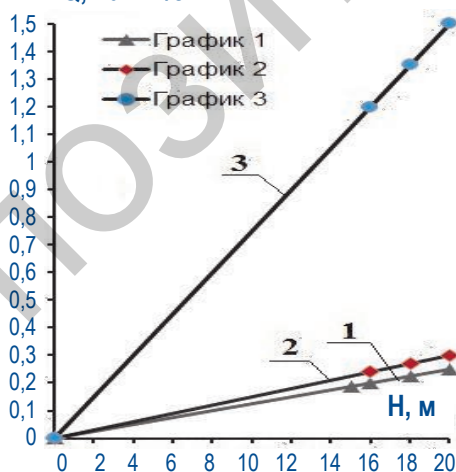


Рисунок 5 – Графики $Q = f(H)$:

- 1- при закачке в одну трубку в начале промывки, $a_1=0,011 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м})$;
- 2- при закачке в одну трубку в конце промывки, $a_2=0,015 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м})$;
- 3 - при закачке в четыре трубки, $a_3=0,055 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м})$.

В опытах использовали экспериментальный образец установки для регенерации скважин, которая включала в себя погружной насос ЭЦВ 6-10-50, насос системы про-

мывки ХМ 32-20-125 К-5, емкость $V=1 \text{ м}^3$, водомер, пульта управления насосами, запорную арматуру и шланги. В скважину на шланге $d=50 \text{ мм}$ опускали насос ЭЦВ 6-10-50 на глубину 34 м, а наверху размещали емкость и насос системы промывки (рис. 6).

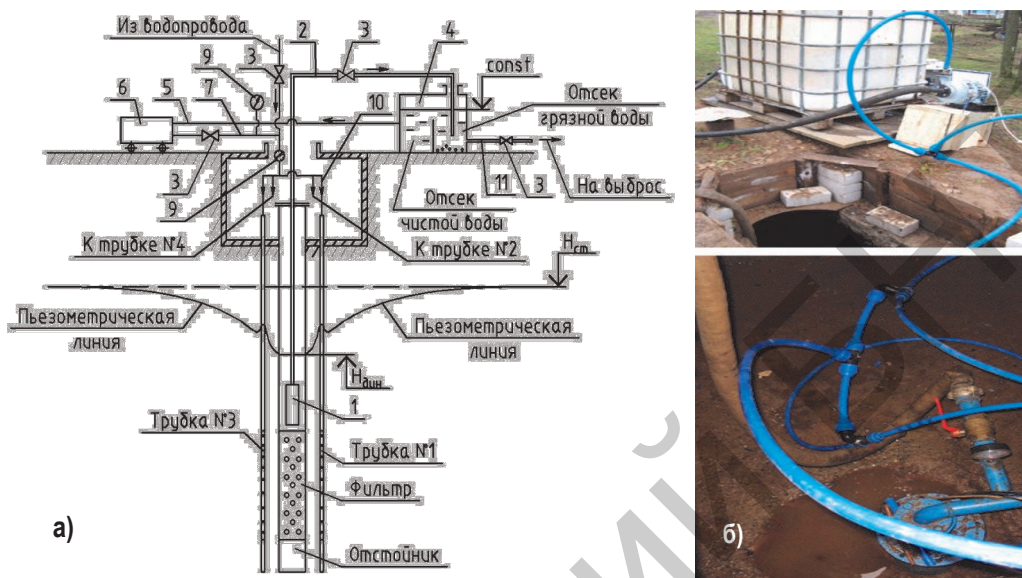


Рисунок 6 - Установка для регенерации скважины:

- а) технологическая схема: 1 – погружной насос; 2 – водоподъемный трубопровод; 3 – венти; 4 – емкость; 5 – всасывающая труба; 6 – насос системы промывки; 7 – нагнетательная линия; 8, 9 – манометры; 10 – гребенка; 11 – сливная линия
 б) общий вид

Насос 6 и погружной насос соседней скважины №1 д. Узла одновременно подавали через гребенку 10 воду в 4 циркуляционные трубки. Это позволяло подавать расходы: от насоса 6 - $Q_n=3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и от скважины №1 - $Q_{с1}=2,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Всего закачной расход составлял $\Sigma Q = Q_n + Q_{с1} = 3 + 2,7 = 5,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Откачной расход из ствола скважины № 2/2011 составлял $Q_{с2} = 7,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и его направляли в процессе промывки погружным насосом 1 назад в емкость. При этом расходе на внешнем контуре установки фильтров циркуляционных трубок в гравийной обсыпке обеспечивалась минимальная промывная скорость $2 \text{ см}/\text{с}$. Процесс промывки осуществлялся в течение двух часов до окончания выноса песка и шлама со скважины. Результаты гидродинамической промывки представлены в табл 1.

Таблица 1 - Результаты регенерации фильтра скважины №2/2011 в д. Узла

Дата замеров	Статический уровень, м	Динамический уровень, м	Понижение уровня, м	Дебит, $\text{м}^3/\text{ч}$	Удельный дебит, $\text{м}^2/\text{ч}$	Относительное увеличение удельного дебита, раз
2011 г. (бурение)	14,5	34	19,5	2	0,1	-
2012 г. (регенерация)	14,5	34	19,5	7,5	0,39	3,9

В результате проведенных натурных испытаний технологии гидродинамической затрубной регенерации удалось повысить удельный дебит скважины с 0,1 м²/ч до 0,39 м²/ч. При одинаковом водопонижении 19,5м, производительность скважины увеличилась с 2 до 7,5 м³/ч.

Выводы

1. В результате лабораторных исследований установлено, что величина промывной скорости фильтрации возрастает с увеличением загрязненности грунта по нелинейной зависимости. Для эффективной затрубной промывки водой крупнозернистого кварцевого песка, закольматированного рыхлым железистым осадком, при снижении его проницаемости на 20-40% относительно первоначальной, и сокращения времени промывки следует рекомендовать промывные скорости фильтрационного потока в диапазоне от 1 до 2 см/с.

2. Полевые гидравлические испытания затрубной системы регенерации скважины позволили получить характеристику поглощающей способности циркуляционных труб в виде графика $Q = f(H)$. Данные зависимости позволяют оценить параметры и подобрать необходимое технологическое оборудование для гидродинамической и циркуляционно-реагентной регенерации скважины.

3. Испытания экспериментального образца установки для гидродинамической промывки гравийной обсыпки скважины в д. Узла Мядельского района подтвердили эффективность такого способа регенерации. Промывка осуществлялась с минимальной промывной скоростью, равной 2 см/с в гравийной обсыпке в месте установки труб. В результате удельный дебит скважины увеличился в 3,9 раза. Способ можно рекомендовать при освоении и регенерации скважин, когда кольматирующий осадок представляет собой рыхлые или желе и пастообразные отложения, поддающиеся струйному размыву.

Библиографический список

1. Квашнин, Г.П. Водозаборные скважины с гравийными фильтрами / Г.П. Квашнин, А.И. Деревянных// Москва: Недра, 1981. – 216 с.
2. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев// 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1985. – 334 с.
3. Алексеев, В.С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В.С. Алексеев, В.Т. Гребенников// Москва: Агропромиздат, 1987. – 239 с.
4. 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 - №а20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 30/06/2005 // Афіцыйны бюл./цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 110.
5. Ивашечкин, В.В. Исследование установившегося движения жидкости в прифильтровой зоне скважины при ее регенерации с помощью трубчатой зафильтровой системы промывки/ В.В. Ивашечкин, П.А. Автушко, А.М. Шейко // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2013. – №5. – С. 85 – 94.

6. Жиленков, В. Н. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость (П 12-83)/ В. Н. Жиленков // - Ленинград: ВНИИГ, 1983.

7. Железняков, Г.В. Гидротехнические сооружения (справочник проектировщика)/Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-Заде, П.Л. Иванов и др. // под общей редакцией В.П. Недриги, - Москва: Стройиздат, 1983- 543с.

8. Мелентьев, В. А. Песчаные и гравелистые грунты намывных плотин / В.А. Мелентьев // Ленинград: Госэнергоиздат, 1960. - 163 с.

Summary

V. Ivashechkin

EXPERIMENTAL STUDIES OF HYDRODYNAMIC FILTER FLUSHING IN WATER WELLS WITH ANNULAR CLEANING SYSTEMS

Hydrodynamic reagent-free flushing of pre-screen zone of water well with annular cleaning system is studied in laboratory and nature conditions. The flushing filtration flow velocity is proposed to be 1-2 cm/s to minimize washing. Due to well regeneration productivity increased 3,9 times.

Поступила 2.10.2015