

УДК 628.112

СООРУЖЕНИЕ И РЕМОНТ ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ С СИСТЕМОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

Канд. техн. наук ИВАШЕЧКИН В. В., инж. АВТУШКО П. А.

Белорусский национальный технический университет

Как известно, конструкции эксплуатационных скважин на воду должны удовлетворять следующим основным требованиям: высококачественное вскрытие продуктивных водоносных горизонтов с тщательной изоляцией их от загрязнения; длительный срок эксплуатации с минимальным темпом снижения производительности; возможность выполнения восстановительных и ремонтных работ. Также известно, что основными причинами выхода скважин из строя являются пескование и недопустимое снижение производительности в результате кольматации фильтра.

Для обеспечения ремонтпригодности в процессе эксплуатации скважины должны оборудоваться прочными коррозионно-устойчивыми фильтрами, иметь достаточный диаметр для спуска необходимого оборудования, выдерживать импульсное и реагентное воздействие. Во всех традиционных конструкциях скважин указанные виды воздействий на кольматирующие отложения производятся изнутри фильтра. Однако большая часть отложений находится в прифильтровой зоне снаружи водоприемной поверхности, поэтому эффективность их разрушения и извлечения известными методами невысока, что приводит к неуклонному снижению производительности и сказывается на долговечности скважин, которая для условий минских водозаборов не превышает 20–25 лет. В то же время долговечность скважин можно увеличить до 50 лет и более, если снабдить их при сооружении затрубной системой реагентной промывки, смонтированной в гравийной обсыпке фильтра. Это позволит доставлять реагент в любую точку закольматированной гравийной обсыпки и регулярно удалять загрязнения. С целью модернизации устаревших конструкций скважин в БНТУ разработана новая конструкция долговечной скважины с затрубной системой реагентной промывки [1, 2].

Новая конструкция также позволяет надежно и с минимальными затратами осуществлять извлечение и замену фильтра, что существенно отличает

ее от стандартных ремонтпригодных конструкций скважин с фильтрами, установленными «впотай».

При установке фильтра «впотай» верх его надфильтровой трубы выводят на 3–10 м над башмаком эксплуатационной колонны, а кольцевое пространство закрепляют гравийным или специальным сальником. Извлечение фильтра при капитальном ремонте такой скважины предполагает спуск ловильного инструмента на бурильных трубах, захват вышедшего из строя фильтра и его извлечение домкратами, проработку ствола долотом, опущенным на бурильной трубе, и спуск нового фильтра. Однако на практике извлечь фильтр удается только в самых редких случаях из-за трудности надежного захвата фильтра, находящегося, как правило, на большой глубине, больших сил сцепления фильтра с породой и опасности разрыва секций фильтра по сварным швам. Поэтому чаще всего капремонт скважины сводится к установке нового фильтра меньшего диаметра вовнутрь вышедшего из строя фильтра (если позволяет внутренний диаметр) с обсыпкой внутреннего фильтра. Скважина после капремонта теряет дебит, быстро кольматируется, становится практически непригодной для текущих ремонтов и служит недолго. Кроме того, опыт эксплуатации скважин с фильтром «впотай» показал, что они часто пескуют через сальник, который разрушается вследствие роста перепада давления на нем при кольматации фильтра и снижения уровня воды в скважине. Поэтому такие ремонтпригодные скважины ненадежны. Тампонаж вышедшей из строя скважины и сооружение новой приводят к неоправданному расходованию средств.

Новая конструкция скважины [1, 2] имеет неизвлекаемый кондуктор, установленный до кровли водоносного горизонта и специальную захватную резьбовую муфту в отстойнике, которые обеспечивают извлечение и замену фильтра.

Рассмотрим технологию строительства, регенерации и реконструкцию новой водозаборной скважины.

Сооружение скважины. Технологическая последовательность сооружения новой водозаборной скважины представлена на рис. 1.

После бурения разведочной скважины 1 (рис. 1а) бурится ствол 2 под кондуктор практически до кровли эксплуатационного водоносного горизонта (рис. 1б). Далее в скважину опускается кондуктор 3 (рис. 1в) и на всю его высоту производится затрубная цементация 4 (рис. 1г). Образовавшуюся цементную пробку 5 выбуривают при вскрытии эксплуатационного водоносного горизонта (рис. 1д). В открытый ствол 6 последовательно опускают фильтровую 7 и эксплуатационную 8 колонны труб (рис. 1е), предварительно прикрепив к ним при помощи захватных приспособлений 9 циркуляционные трубки 10 с фильтрами 11. Фильтр 7 водозаборной скважины и фильтры 11 циркуляционных трубок обсыпают фильтрующей засыпкой 12 до тех пор, пока ее уровень не поднимется на 5–6 м выше башмака кондуктора (рис. 1ж). После производства строительной откачки и дезинфекции скважины определяется положение верхнего уровня фильтрующей засыпки и при необходимости ее досыпают. Затем к кондуктору приваривают плиту 13 для герметизации межтрубного пространства и закрепления устьев циркуляционных трубок, а к устью водозаборной скважины приваривают фланец 14 (рис. 1з). Скважину заканчивают.

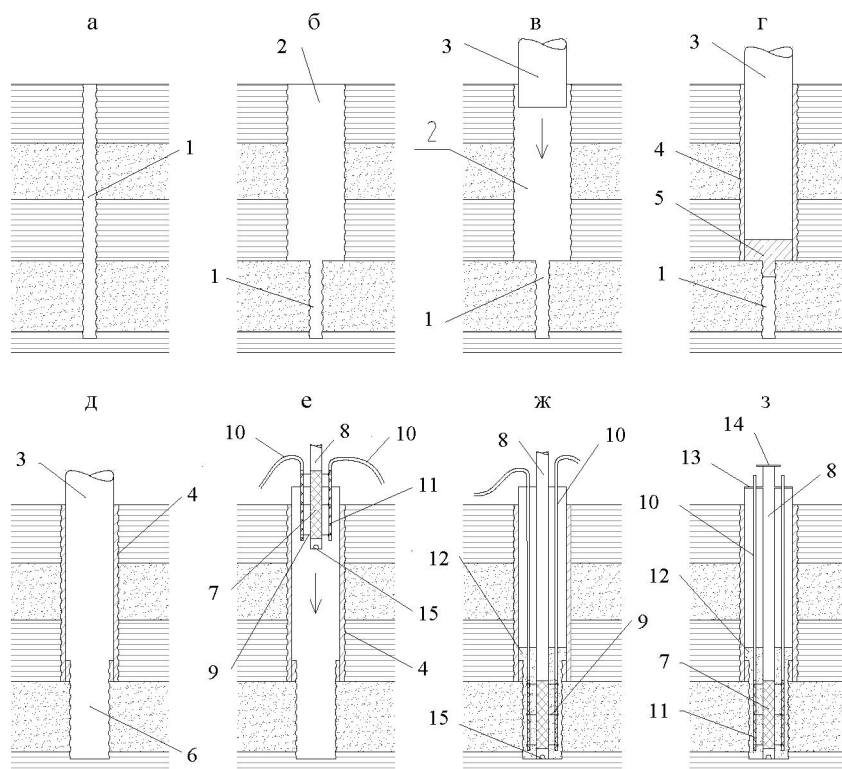


Рис. 1. Технологическая последовательность бурения водозаборной скважины: 1 – ствол разведочной скважины; 2 – ствол скважины для кондуктора; 3 – кондуктор; 4 – затрубная цементация; 5 – цементная пробка; 6 – ствол скважины для фильтровой колонны; 7 – фильтровая колонна с отстойником; 8 – эксплуатационная колонна; 9 – захватное приспособление; 10 – циркуляционные трубки; 11 – фильтры циркуляционных трубок; 12 – фильтрующая засыпка; 13 – герметизирующая плита; 14 – герметичный оголовок; 15 – резьбовая захватная муфта

Поддержание стабильной работы скважины. Основное назначение циркуляционных трубок заключается в получении доступа в прифильтровую зону водозаборной скважины с целью осуществления там циркуляции реагента. Кроме того, циркуляционные трубки используются в качестве затрубных пьезометров для контроля пьезометрического уровня подземных вод за стенкой фильтра, что необходимо для мониторинга обобщенного гидравлического сопротивления. Колонна и фильтр циркуляционной трубки могут быть выполнены из полиэтиленовой трубы (ПЭ63 или ПЭ80) с наружными диаметрами от 32 до 50 мм. Такие трубы долговечны, обладают высокой химической стойкостью и механической прочностью, эластичны, являются экологически безопасными и дешевыми. Выпуск полиэтиленовых труб освоен в Республике Беларусь, и они могут поставляться в бухтах длиной до 100 м. Фильтр для упрощения конструкции может быть трубчатый (перфорированный или щелевой) без дополнительной водоприемной поверхности.

При снижении удельного дебита водозаборной скважины более чем на 25 % по отношению к начальному при бурении производится ее текущий ремонт, который предполагается осуществлять по нескольким принципиальным схемам.

Согласно первой схеме регенерации (рис. 2а) между фильтровой и надфильтровой зонами водозаборной скважины для разрыва их гидравлической связи устанавливается пакер.

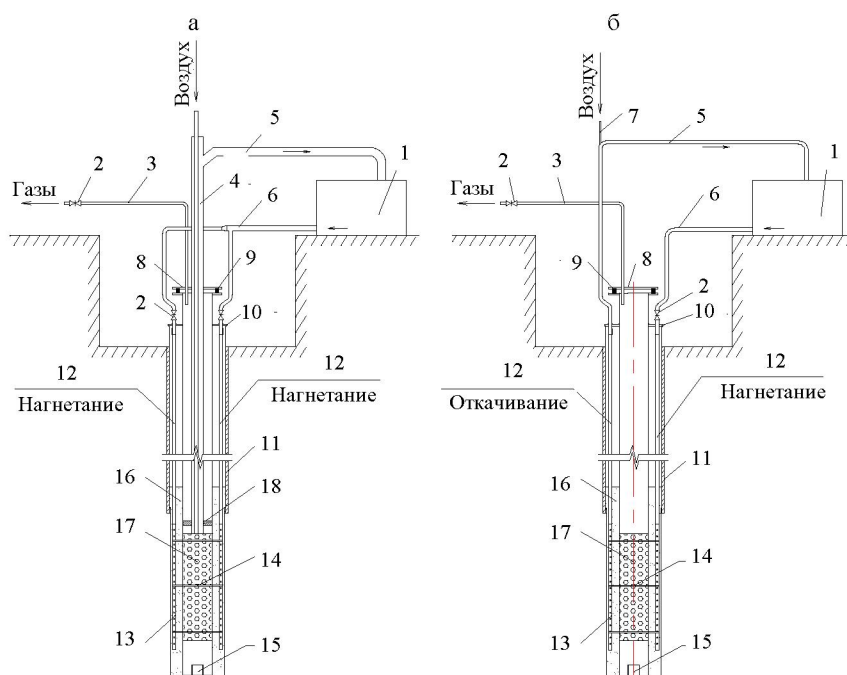


Рис. 2. Водозаборная скважина в период ее регенерации реагентно-циркуляционным способом: а – с откачкой реагента из ствола скважины; б – то же из циркуляционных трубок; 1 – напорный бак; 2 – вентиль; 3 – труба выпуска газа; 4 – эрлифт; 5 – входной шланг; 6 – выходной шланг; 7 – труба подачи сжатого воздуха; 8 – герметичный оголовок; 9 – уплотнение; 10 – герметизирующая плита; 11 – затрубная цементация; 12 – нагнетательные трубы; 13 – фильтровая часть нагнетательных труб; 14 – захватное приспособление; 15 – муфта; 16 – фильтрующая засыпка; 17 – фильтр скважины; 18 – пакер

В циркуляционные скважины из бака непрерывно подается реагент, который, пройдя гравийную обсыпку, вместе с продуктами растворения откачивается из-под пакерного пространства назад в бак, откуда снова подается в циркуляционные трубки, т. е. происходит циркуляция реагента в прифильтровой зоне.

При второй схеме регенерации (рис. 2б) предполагается задействовать только циркуляционные скважины. Например, при четырех циркуляционных трубках реагент подается из бака в две диаметрально противоположные трубки № 1 и 3, а выкачивается из трубок № 2 и 4. Для этого в откачные трубки № 2 и 4 опускают шланги, в которые подают сжатый воздух от компрессора. В результате система начинает работать как эрлифт и реагент из откачных трубок № 2 и 4 вместе с продуктами растворения откачивается назад в бак, откуда он снова подается в закачные трубки № 1 и 3, т. е. происходит циркуляция (рис. 2б). Затем меняют направление циркуляционного потока, производя закачку реагента в трубки № 2 и 4, и откачку из трубок № 1 и 3. Реверсирование потока реагента позволяет повысить качество регенерации прифильтровой зоны. Однако можно не ограничиваться только такой схемой циркуляции. Можно также подавать реагент в две смежные циркуляционные трубки, а откачку производить из двух других.

Контроль процесса растворения производится по стабилизации перепада уровней в откачных и закачных трубках. Для ликвидации железо- и сульфатобактерий, продукты жизнедеятельности которых также накапливаются в порах гравийной обсыпки, в циркуляционные скважины можно закачивать дезинфицирующий раствор и также производить его циркуляцию.

Для третьей схемы регенерации используется метод циклического за- давливания реагента за контур фильтра сжатым воздухом. Для задавливания реагента используются циркуляционные трубки. После заливки реагента в трубки компрессором нагнетают в них воздух для отжатия уровня реагента, и компрессор отключают. Затем сбрасывают давление воздуха и газов. Раствор, отжатый за контур, возвращается в фильтровую часть циркуляционных трубок, где, смешиваясь с реагентом, повышает свою концентрацию. Время между циклами задавливания принимается равным 5–10 мин.

К четвертой схеме регенерации следует отнести комбинированную, когда для восстановления требуемого дебита скважины не ограничиваются только одной схемой или методом, а применяют сразу несколько, например циркуляционно-реагентный в комплексе с импульсным методом.

Реконструкция скважины. При снижении эффективности текущих ремонтов или выходе из строя фильтра принимается решение о реконструкции скважины, которая предполагает операции извлечения старого фильтра, его замены, выбуривания старой гравийной обсыпки и установку нового фильтра с обсыпкой его гравием. Для разработки технологии реконструкции и подбора механизмов, обеспечивающих извлечение эксплуатационной колонны с фильтром, необходимо знать диапазон возможных подъемных усилий, возникающих при извлечении. Здесь следует иметь в виду два случая: 1) фильтр закольматирован рыхлыми отложениями; 2) фильтр закольматирован прочными отложениями в виде цемента обрастания.

В первом случае требуемое подъемное усилие при извлечении только статической силой можно найти по формуле

$$P_{\text{п}} = G + F_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где G – общий вес извлекаемой эксплуатационной колонны и фильтра; $F_{\text{тр}}$ – сила трения извлекаемых частей о породу.

Вес

$$G = g (q_{\text{кол}} l_{\text{кол}} + q_{\text{ф}} l_{\text{ф}}), \quad (2)$$

где $q_{\text{кол}}$, $q_{\text{ф}}$ – соответственно массы 1 м. п. колонны и фильтра, имеющих длины $l_{\text{кол}}$ и $l_{\text{ф}}$.

Силу трения $F_{\text{тр}}$ найдем как произведение горизонтальной составляющей N бокового давления породы и коэффициента трения f извлекаемых частей о породу

$$F_{\text{тр}} = Nf. \quad (3)$$

Силу N можно вычислить по методике расчета сил давления на подпорные стенки [3], которая используется для расчета напряжений в стенках скважин [4]. Конструкция скважины предусматривает установку кондукто-

ра до водоносного горизонта (рис. 1з), тогда эксплуатационная колонна находится под его защитой и не подвергается воздействию горного давления. Горное давление передается только на фильтр скважины. Поэтому сила трения при извлечении эксплуатационной колонны с фильтром действует только на внешней поверхности фильтра.

При допущении о треугольной эпюре распределения горизонтальных напряжений от горного давления по глубине, напряжения σ_v на верхней и нижней σ_n отметке фильтра соответственно равны:

$$\sigma_v = \sum K_{ai} \gamma_i h_i; \quad (4)$$

$$\sigma_n = \sum K_{ai} \gamma_i h_i + K_{an} \gamma_n l_\phi, \quad (5)$$

где K_{ai} – коэффициент активного давления i -го слоя грунта толщиной h_i и удельным весом γ_i ; K_{an} , γ_n – то же самое водоносного пласта; $K_a = \operatorname{tg}^2(45^\circ - 0,5\varphi)$; φ – угол внутреннего трения грунта.

Удельный вес γ_n грунта водоносного пласта и других водонасыщенных грунтов определяется с учетом взвешивающего влияния воды по формуле

$$\gamma_n = g \rho_c (\rho_n - 1000) / \rho_n, \quad (6)$$

где ρ_c – объемная масса скелета грунта; ρ_n – плотность грунта водоносного горизонта.

Горизонтальную составляющую N бокового давления породы на фильтр найдем как объем эпюры давления, действующего на фильтр длиной l_ϕ и наружным диаметром d_ϕ . Тогда получим

$$N = 0,5 l_\phi (\sigma_v + \sigma_n) \pi d_\phi. \quad (7)$$

Окончательно подъемное усилие составит

$$P_a = g (q_{\text{кол}} l_{\text{кол}} + q_\phi l_\phi) + 0,5 f l_\phi (\sigma_v + \sigma_n) \pi d_\phi. \quad (8)$$

Во втором случае, когда в результате минерализации колюматизирующих отложений происходит образование цемента обрастания и на фильтре образуется небольшая корка из цемента обрастания толщиной δ , подъемное усилие увеличится за счет возрастания площади трения и коэффициента трения цементной корки о гравий, который станет равным f_1 . Тогда (8) будет иметь вид

$$P_a = g (q_{\text{кол}} l_{\text{кол}} + q_\phi l_\phi) + 0,5 f_1 l_\phi (\sigma_v + \sigma_n) \pi (d_\phi + 2\delta). \quad (9)$$

При образовании значительной по толщине корки, соизмеримой с толщиной гравийной обсыпки, для подъема фильтра необходимо преодолеть усилие $F_{\text{сдв}}$ на сдвиг (срез), который происходит по наружной поверхности тонкой корки, сложенной наиболее прочными отложениями и имеющей наилучшее сцепление с фильтром. В этом случае (8) будет иметь вид

$$P_a = G + F_{\text{сдв}} = g (q_{\text{кол}} l_{\text{кол}} + q_\phi l_\phi) + [R_{\text{сдв}}] \omega_{\text{сдв}}, \quad (10)$$

где $[R_{\text{сдв}}]$ – временное сопротивление цементированной гравийной обсыпки на срез; $\omega_{\text{сдв}}$ – площадь, по которой происходит срез, $\omega_{\text{сдв}} = \pi(d_{\phi} + 2\delta)l_{\phi}$.

Теоретические зависимости устанавливают взаимосвязь между основными параметрами, влияющими на величину подъемного усилия при извлечении. Наиболее важным фактором являются сила трения и сила сдвига, для снижения которых следует предусматривать определенные мероприятия. Чтобы оценить величину подъемной силы, рассмотрим пример.

Пример. Определить требуемое статическое подъемное усилие $P_{\text{п}}$ только статической нагрузкой при реконструкции водозаборной скважины при следующих данных: фильтр ТП 10Ф2В (трубчатый с проволочной обмоткой из нержавеющей стали) длиной $l_{\phi} = 10$ м, наружным диаметром $d_{\phi} = 299$ мм при $q_{\phi} = 70$ кг присоединен к эксплуатационной колонне с размерами $l_{\text{кол}} = 60$ м, $d_{\text{кол}} = 273$ мм, $q_{\text{кол}} = 58,6$ кг. В кровле водоносного горизонта в интервале от 0–60 м находятся глинистые пески $\gamma_1 = 16$ кН/м³, $\varphi = 32^\circ$, $h_1 = 50$ м. Водоносный пласт сложен водонасыщенными песками $\gamma_{\text{п}} = 10,3$ кН/м³, $\varphi_{\text{п}} = 30^\circ$, $h_{\text{п}} = 10$ м. Коэффициент трения скольжения стали по гравию $f = 0,45$, цементной корки по гравию $f_1 = 0,5$.

Вес G находим по (2)

$$G = 9,81 \cdot (60 \cdot 58,6 + 10 \cdot 70) = 41 \text{ кН.}$$

Силу трения $F_{\text{тр}}$ определим по (3) с учетом (7)

$$F_{\text{тр}} = 0,45 \cdot 0,5 \cdot 10 \left[2\text{tg}^2(45^\circ - 0,5 \cdot 32) \cdot 16 \cdot 50 + \text{tg}^2(45^\circ - 0,5 \cdot 30) \cdot 10,3 \cdot 10 \right] \times \\ \times 3,14 \cdot 0,299 = 1110 \text{ кН.}$$

Тогда подъемное усилие согласно (1) $P_a = 41 + 1110 = 1151$ кН.

При образовании цементной корки толщиной $\delta = 8$ мм сила трения $F_{\text{тр}}$ возрастет

$$F_{\text{тр}} = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 10 \left[2\text{tg}^2(45^\circ - 0,5 \cdot 32) \cdot 16 \cdot 50 + \text{tg}^2(45^\circ - 0,5 \cdot 30) \cdot 10,3 \cdot 10 \right] \cdot 3,14 \times \\ \times (0,299 + 0,016) = 1300 \text{ кН.}$$

Тогда подъемное усилие $P_a = 41 + 1300 = 1341$ кН, что на 14 % больше, чем в первом случае.

Для расчета подъемного усилия по (10) необходимы опытные значения $[R_{\text{сдв}}]$ – временного сопротивления цементированной гравийной обсыпки на срез. В этом случае подъемное усилие будет наибольшим.

Расчеты указывают на значительные величины подъемных усилий при извлечении труб только статическим выдергиванием. Опытами по извлечению различными способами из песчано-глинистого грунта трубы длиной 5,5 м и диаметром 159 мм, проведенными во ВНИИГС [5], установлено, что тяговые статические усилия при извлечении составили: только статической силой – 390 кН; совместным действием статической силы и вибратора – 290 кН; совместным действием статической силы и одноударного вибромолота с ударами вверх – 230 кН; совместным действием статической силы и одноударного вибромолота с ударами вверх и вниз – 200 кН. При этом суммарная сила тяжести трубы и вибромеханизма – 55 кН.

Анализ результатов экспериментальных исследований и производственный опыт извлечения обсадных труб из бездействующих скважин показывают, что наиболее рациональным и простым способом извлечения является способ, сочетающий статическое и вибрационное воздействие на колонну [5]. ВНИИГС предложил варианты состава специализированного оборудования для ликвидации скважин различной глубины с извлечением обсадных труб различных диаметров (табл. 1).

Таблица 1

Варианты специализированного оборудования для извлечения обсадных труб из скважин различной глубины [5]

Глубина скважин, м	Диаметр труб, мм	Предельная масса извлекаемой колонны труб, кг	Грузоподъемное оборудование	Вибрационная машина
20	До 114	400	Вибробуровой агрегат АВБ-2М	ВБ-7
50	168–426	3000	Агрегат для освоения и ремонта скважин на воду АВР-1 с гидродомкратами ГД-40	ВПФ-2
80	219–530	6000	Ремонтный агрегат РА-15 Установка для извлечения обсадных труб ОИТ-1	БВС-1 БВС-1
100	219–630	10000	Агрегат для ремонта и бурения скважин А-50У	ВШ-1

Указанное технологическое оборудование может быть использовано при реконструкции предлагаемой водозаборной скважины.

Перед извлечением проводится импульсная обработка фильтра и закачка в фильтрующую засыпку через циркуляционные скважины реагента, который размягчает цементационные связи на контакте гравийной обсыпки и водоприемной поверхности фильтра. После прокачки производится извлечение колонны труб с помощью грузоподъемного механизма с вибропогружателем или вибромолотом (рис. 3).

Вибропогружатель сообщает извлекаемому из грунта элементу направленные вдоль их оси колебания определенной частоты и амплитуды, благодаря чему резко снижается коэффициент трения между грунтом и поверхностью извлекаемого элемента. Кроме этого, конструкция позволяет в случае необходимости опустить в ствол скважины колонну бурильных труб, конец которой заводится в отстойник и соединяется, вращением влево, с левой резьбой муфты (рис. 1, 2). Далее для извлечения используются домкраты, при этом исключается возможность обрыва обсадных труб и фильтра, так как при таком способе подъема колонна работает на сжатие, а все растягивающие усилия воспринимают бурильные трубы.

После извлечения эксплуатационной и фильтровой колонн, в кондуктор на забой опускают породоразрушающий инструмент. В процессе бурения удаляют старую фильтрующую обсыпку вместе с остатками циркуляционных скважин. Заменяв или восстановив фильтр, его опускают в открытый ствол вместе с отстойником и новыми циркуляционными скважинами. Извлеченные стальные обсадные трубы используются повторно. После этого устраивают новую фильтрующую обсыпку. Скважину заканчивают.

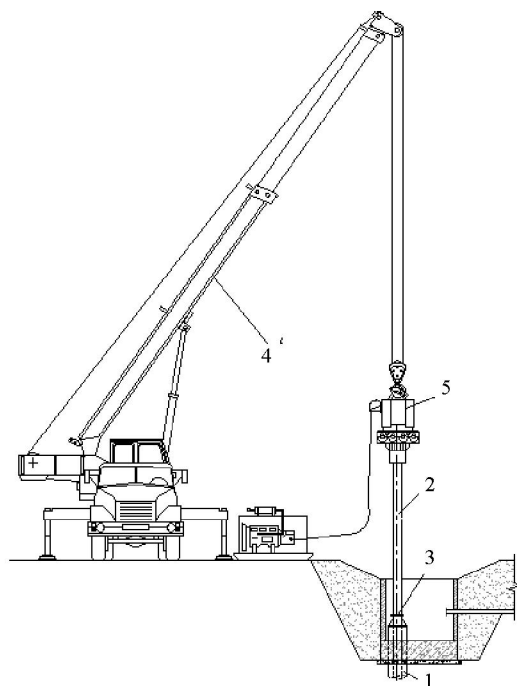


Рис. 3. Схема извлечения фильтра скважины на обсадных трубах с помощью вибропогружателя «Мюллер» фирмы KRUPP HENDEL и грузоподъемного крана: 1 – обсадная труба; 2 – труба с фланцем; 3 – фланцевое соединение; 4 – грузоподъемный кран; 5 – вибропогружатель

Согласно [5] на объектах «Союзшахтосушение» проведено опытное извлечение труб диаметром 273–426 мм с помощью виброустановки ВНИИ-ГСа типа ВНОТ-1 из нескольких скважин глубиной до 100 м после 10-летнего их пребывания в грунте. В результате установлена пригодность извлеченных труб к повторному использованию, что дает основание полагать, что извлеченную при реконструкции колонну обсадных труб можно использовать повторно.

ВЫВОДЫ

В новой конструкции скважины отсутствует ненадежное сальниковое уплотнение. Кондуктор обеспечивает защиту от проникновения загрязнений и не извлекается. Положительно решается вопрос повторного использования обсадных труб. Обрыв обсадных труб и фильтра практически исключен.

Предлагаемая конструкция скважины может найти применение при каптаже подземных вод из межморенных четвертичных водоносных комплексов, широко распространенных на территории Республики Беларусь. Так, только в г. Минске на балансе УП «Минскводоканал» находятся 495 водозаборных скважин, пробуренных на днепровско-сожский водоносный комплекс. Глубины скважин не превышают 90 м. Средний срок работы скважин с высокими удельными дебитами составляет 8–12 лет. За пределами этого срока эксплуатация скважины экономически неэффектив-

на, так как снижается ее удельный дебит, возрастает себестоимость добываемой воды и применяемые меры по регенерации фильтров скважины становятся неэффективными. Последний фактор объясняется цементацией кольматирующих отложений и трудностью их извлечения из прифильтровой зоны. Возникает альтернатива: эксплуатировать скважину с высокими удельными затратами или перебурить ее. Стоимость бурения 1 п. м скважины составляет более 400 дол. США. В суммарном долларovém эквиваленте перебуривание скважины глубиной 90 м и тампонаж старой скважины составляют порядка 40 тыс. дол. Если пробурить скважину предлагаемой конструкции, можно сэкономить порядка 3/4 указанной суммы за счет ее эксплуатации в течение 50 лет (отпадает необходимость перебуривания через 25 лет).

ЛИТЕРАТУРА

1. К о н с т р у к ц и я 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. И в а ш е ч к и н, В. В. Способы повышения долговечности и ремонтпригодности водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович // Международное сотрудничество в решении водно-экологических проблем: материалы Междунар. водного форума, Минск, 2–3 окт. 2008 г. / Минприроды РБ [и др.]. – Минск, 2008. – С. 292–293.
3. П о с о б и е к строительным нормам РБ. Проектирование и устройство подпорных стен и креплений котлованов. П 17-02 к СНБ 5.01.01–99. – Минск: Минстройархитектуры, 2003. – 72 с.
4. Б а ш к а т о в, Д. Н. Прогрессивная технология бурения гидрогеологических скважин / Д. Н. Башкатов, А. В. Панков, А. М. Коломиец. – М.: Недра, 1992. – 286 с.
5. Ц е й т л и н, М. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах / М. Г. Цейтлин, В. В. Верстов, Г. Г. Азбель. – Л.: Стройиздат, 1987. – 262 с.

Представлена кафедрой
гидравлики

Поступила 20.09.2010