

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-141-153>

УДК 628.112

Циркуляционно-реагентная обработка скважин на воду при помощи пневматического мембранного насоса

Инж. А. А. Артёмчик¹⁾, докт. техн. наук, проф. В. В. Ивашечкин¹⁾, инж. А. В. Житко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье представлено описание оборудования установки для восстановления производительности водозаборных скважин путем продольной циркуляционно-реагентной обработки фильтра и прифильтровой зоны. Оборудование включает емкость для реагента, пневматический мембранный циркуляционный насос, размещенный над уровнем воды в скважине, систему трубопроводов и трубчатый гофрированный элемент, помещенный с кольцевым зазором внутрь очищаемого фильтра по всей его длине. Изложен технологический процесс обработки, который предусматривает непрерывную циркуляцию реагента насосом в кольцевом канале, образованном внутренними непроницаемыми стенками гофрированного элемента и наружными проницаемыми стенками фильтра, через отверстия которого реагент проникает в прифильтровую зону и обеспечивает равномерную декольматацию гравийной обсыпки. Обоснованы ключевые преимущества предложенного решения: повышение эффективности декольматации фильтра и прифильтровой зоны, снижение энергопотребления и возможность использования широкого спектра реагентов, включая дитионит натрия. Кроме того, предлагаемое решение обеспечивает снижение трудоемкости технологических операций, проводимых персоналом при обработке скважин, дебит которых снизился. Приведены расчетные схемы движения жидкости для двух эксплуатационных режимов работы оборудования: 1) непрерывной циркуляции реагента в системе «мембранный насос – нагнетательный трубопровод – фильтр скважины – всасывающий трубопровод – мембранный насос»; 2) откачки отработанного раствора из скважины в бак. Для этих режимов составлены уравнения движения реагента и продуктов реакции, которые решены графоаналитическим методом. Приведенная методика гидравлического расчета позволяет получить значения циркуляционного расхода и промывной скорости в зависимости от величины статического уровня воды в скважине, геометрических размеров фильтра и трубопроводов, подобрать необходимое технологическое оборудование. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: водозаборная скважина, регенерация, кольматация, декольматация, мембранный насос, циркуляционно-реагентная обработка, реагентная обработка, восстановление дебита

Для цитирования: Артёмчик, А. А. Циркуляционно-реагентная обработка скважин на воду при помощи пневматического мембранного насоса / А. А. Артёмчик, В. В. Ивашечкин, А. В. Житко // *Наука и техника*. 2026. Т. 25, № 2. С. 141–153. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2026-25-2-141-153>

Circulation-Reagent Treatment of Water Intake Wells Using a Pneumatic Diaphragm Pump

A. A. Artemchik¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, A. V. Zhytko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents the equipment of an installation for restoring the productivity of water intake wells through longitudinal circulation-reagent treatment of the filter and the filter-adjacent zone. The equipment includes a reagent tank, a diaphragm pump placed above the water level in the well, a pipeline system, and a resistance element placed with an annular gap inside the filter being cleaned, ensuring uniform filter declogging along its entire length. The treatment technological process is described, which involves the continuous circulation of the reagent by the pump in the annular channel formed by the inner impermeable walls of the corrugated element and the outer permeable walls of the filter. Through the filter's openings, the reagent penetrates into the filter-surrounding zone and ensures uniform decolmatation of the gravel pack. The key

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67/2,
220065, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
ivashechkin_vlad@bntu.by

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
67/2, Nezavisimosty Ave.,
220065, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
ivashechkin_vlad@bntu.by

advantages of the proposed solution are substantiated: increased efficiency of filter and filter-surrounding zone decolmatation, reduced energy consumption, and the ability to use a wide range of reagents, including sodium dithionite. Furthermore, the proposed solution reduces the labor intensity of technological operations performed by personnel when treating wells with decreased flow rates. Calculated flow schemes for two operational modes of the equipment are provided: 1) continuous reagent circulation in the system “diaphragm pump – injection pipeline – well filter – suction pipeline – diaphragm pump”; 2) pum-ping of the waste solution from the well into the tank. For these modes, equations of motion for the reagent and reaction products were compiled and solved using a graphoanalytical method. The presented hydraulic calculation methodology allows to obtain values of circulation flow rate and flushing velocity depending on the static water level in the well, the geometric dimensions of the filter and pipelines, and to select the necessary technological equipment. An example of calculation is given.

Keywords: water intake well, water well, regeneration, colmatation, decolmatation, diaphragm pump, circulating-reagent treatment, reagent treatment, flow rates rehabilitation

For citation: Artemchik A. A., Ivashechkin V. V., Zhytko A. V. Circulation-Reagent Treatment of Water Intake Wells Using a Pneumatic Diaphragm Pump. *Science and Technique*. 25 (2), 141–153 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-25-2-141-153>

Введение

Одной из ключевых проблем эксплуатации водозаборов подземных вод остается низкий срок службы высокодебитных скважин. Забор больших объемов воды приводит к интенсивной химической кольматации фильтров и прифильтровых зон, увеличению их гидравлических сопротивлений, снижению удельного дебита и повышению себестоимости добываемой воды. Чтобы не перебуривать такие скважины и поддерживать их производительность на необходимом уровне, следует регулярно поводить работы по декольматации.

По характеру воздействия на кольматирующие образования известные технологии восстановления дебита скважин можно условно разделить на механические [1–4], гидродинамические [5–7], реагентные (химические) [8–13], импульсные [1, 14–16] и комбинированные.

Как показывает опыт, предлагаемые методы имеют определенную область применения, которая определяется прочностью кольматанта, зависящей от степени его минерализации, и глубиной проникновения в прифильтровую зону. Например, механические методы [1–2] не всегда обеспечивают удаление кольматанта с наружной поверхности фильтра, а гидродинамические методы [5–7] – из прифильтровой зоны. Импульсные технологии, несмотря на простоту, сопряжены с риском разрушения фильтров, ослабленных коррозией, особенно при их интенсивной обработке, и достаточно эффективны для скважин, эксплуатирующихся непродолжительный период времени [14–15]. Метод электрогидроудара опасен поражением электрическим током и недостаточно эффективен при регенерации скважин диаметром более 250 мм [9].

Всем приведенным выше физическим методам присуще ограниченное проникновение в прифильтровую зону, что не позволяет восстановить исходную производительность скважин. Более высокая эффективность достигается при использовании установок, в которых процесс декольматации осуществляется за счет химического разрушения кольматанта (реагентный метод). Известны способы: реагентной ванны, циклического задавливания, циркуляции реагента.

Способ реагентной ванны обеспечивает проникновение реагента в закольматированную зону под влиянием процессов диффузии, поэтому растворение кольматирующих соединений происходит в статических условиях, а обработка длится от 10 до 24 ч, при которой продукты реакции могут выступать экраном для поступающего реагента, что в свою очередь замедляет процесс регенерации.

К недостаткам циклического задавливания относится ограничение максимального размера обрабатываемой зоны объемом столба жидкости от верха фильтра до статического уровня, а также неравномерность очистки фильтра ввиду преференциального движения реагента по наиболее проницаемым участкам прифильтровой зоны и невозможность регулирования размеров зоны обработки [9].

Анализ циркуляционно-реагентных способов [8–15] показал, что они не в полной мере обеспечивают равномерную декольматацию, их также характеризуют утечки реагента в водоносный пласт. Многопакерные схемы [8; 9, с. 21–24; 10; 12–13] увеличивают равномерность обработки, но им также свойственно разбавление реагента и они отличаются сложной

конструкцией. С целью повышения растворяющей способности реагента в пределах закольматированной прифилтровой зоны во ВНИИВОДГЕО предложен элемент для создания сопротивления в виде негерметичных перегородок в форме дисков, помещенных с кольцевым зазором внутрь очищаемого фильтра [11]. Установки, в конструкции которых предлагается использовать осевой насос для создания циркуляции [9, с. 22–24], могут быть использованы только в скважинах, эксплуатирующихся непродолжительный период с незначительным количеством кольматанта, находящегося в пастообразном и рыхлом состоянии, так как конструкция не предполагает перекачивания жидкостей с твердыми включениями. Циркуляция может достигаться при помощи эрлифта, однако использование последнего в качестве устройства для создания циркуляции исключает возможность применения порошкообразного дитионита натрия и требует применения мер химической защиты [8, 11]. Использование струйного насоса предполагает применение центробежных реагентных насосов, которые не отличаются большими напорами, при этом создаются огромные потери напора в самом струйном насосе. В совокупности это ограничивает возможность регенерации скважин со значительной глубиной нахождения статического уровня [17].

На практике внедрению многих рассмотренных методов регенерации препятствуют их технологическая сложность, высокая стоимость и потенциальная опасность. Эти факторы делают их непривлекательными для производственных организаций, которые отдают предпочтение простым и надежным технологическим решениям. В результате широко распространенной практикой остается перебуривание скважин. Поэтому производству важно получить простое оборудование и безопасный технологический процесс.

Таким образом, существует устойчивая производственная потребность в создании эффективных технологий реагентной регенерации, характеризующихся простотой и надежностью применяемого оборудования, способных обеспечивать интенсивное и контролируемое воздействие на кольматирующие отложения и в которых будут отсутствовать ограничения по

типу применяемых реагентов. Продление срока службы водозаборов из подземных источников является актуальной и важной научно-практической задачей.

В качестве одного из таких решений предлагается способ циркуляционно-реагентной регенерации скважин, в котором для создания непрерывной циркуляции применяется пневматический мембранный насос, позволяющий перекачивать широкий спектр жидкостей, включая среды, содержащие взвешенные твердые частицы. Равномерность очистки фильтра достигается за счет специального элемента для создания сопротивления, помещенного с кольцевым зазором в фильтр скважины.

Целью настоящей работы является разработка методик гидравлического расчета и подбора технологического оборудования для циркуляционно-реагентной регенерации скважин с помощью пневматического мембранного насоса.

Основная часть

Принцип действия пневматического мембранного насоса AODD (Air Operated Double Diaphragm), его конструкция и эксплуатационные преимущества. Конструкция мембранного насоса с пневматическим приводом включает две идентичные рабочие камеры. Каждая камера оснащена гибкой мембраной и двумя обратными клапанами, что функционально представляет собой два насоса в одном корпусе. Рабочий цикл насоса состоит из двух тактов, обеспечиваемых возвратно-поступательным движением пневмопривода.

При движении пневмодвигателя влево (рис. 1а) жидкость в левой насосной камере через шаровой клапан вытесняется в выпускной патрубок «В» и одновременно засасывается в правую насосную камеру через впускной патрубок «С».

При движении пневмодвигателя вправо (рис. 1б) жидкость в правой насосной камере через шаровой клапан вытесняется в правый выпускной патрубок и одновременно засасывается в левую насосную камеру через левый нижний впускной патрубок. Циклическое повторение тактов обеспечивает непрерывный поток перекачиваемой среды.

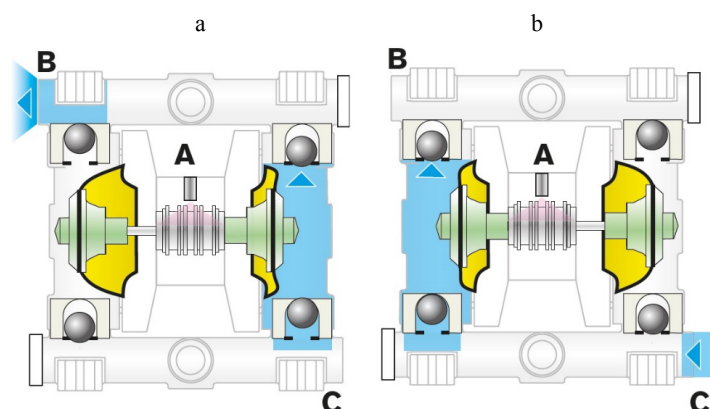


Рис. 1. Схема работы насоса при движении пневмодвигателя:
а – движение привода влево; б – вправо

Fig. 1. Pump operation diagram for pneumatic actuator movement
a – actuator movement to the left; b – actuator movement to the right

К ключевым эксплуатационным преимуществам, определяющим эффективность применения мембранных пневматических насосов в циркуляционно-реагентных установках, можно отнести следующие:

1) универсальность и химическую стойкость. Конструкция насоса позволяет изготавливать его из различных материалов (полипропилена, фторопласта, нержавеющей стали), что обеспечивает полную химическую совместимость с реагентами, применяемыми в процессе декольматации фильтров водозаборных скважин. Кроме того, конструктивные особенности насоса делают его пригодным для перекачивания сред с твердыми включениями, такими как частицы кольматанта;

2) то, что при работе мембранного насоса за счет попеременного движения мембран создается пульсирующий поток реагента, омывающего кольматирующие отложения, что интенсифицирует процесс растворения;

3) надежность и безопасность. Насос способен работать без жидкости до ее появления во всасывающем трубопроводе без риска повреждения. При перекрытии напорного трубопровода насос останавливается, а потребление воздуха прекращается. При перекрытии всасывающего трубопровода насос также останавливается, однако может наблюдаться расход воздуха при холостом ходе. Конструкция насоса исключает возможность образования искры и нагрева сверх допустимой температуры, что позволяет применять мембранный насос в помещениях со взрывоопасной средой;

4) эксплуатационные преимущества. Для запуска насоса необходимо подключить всасы-

вающий и напорный трубопроводы, а также источник сжатого воздуха. Мембранный насос обладает сравнительно небольшим весом. Производительность и создаваемый напор плавно регулируются изменением расхода подаваемого воздуха от компрессора. Насос способен поднимать жидкость с высоты до 7,6 м при незаполненном всасывающим трубопроводе.

Предлагаемая конструкция устройства для циркуляционно-реагентной обработки представлена на рис. 2.

Обработка фильтра и прифилтровой зоны водозаборной скважины осуществляется следующим образом.

Подготовительные работы. Нагнетательный трубопровод 6 со смонтированными на нем элементом для создания сопротивления в виде гофрированной пластиковой трубы 11, мембранным насосом 5 с подключенными к нему воздухопроводом 12 и всасывающим трубопроводом 8, соединенным с кольцевым перфорированным патрубком 4, к которому подключен заливочный трубопровод 2, опускают в скважину и вывешивают на ее оголовке. Мембранный насос должен находиться над уровнем жидкости в скважине, а гофрированная пластиковая труба располагаться внутри очищаемого фильтра. После этого трубопровод для заливки 2, оснащенный запорным элементом 3, подключают к емкости с реагентом 1, а отводящий трубопровод 9 с запорным элементом 10 опускают в емкость с реагентом, воздухопровод подключают к компрессору 13.

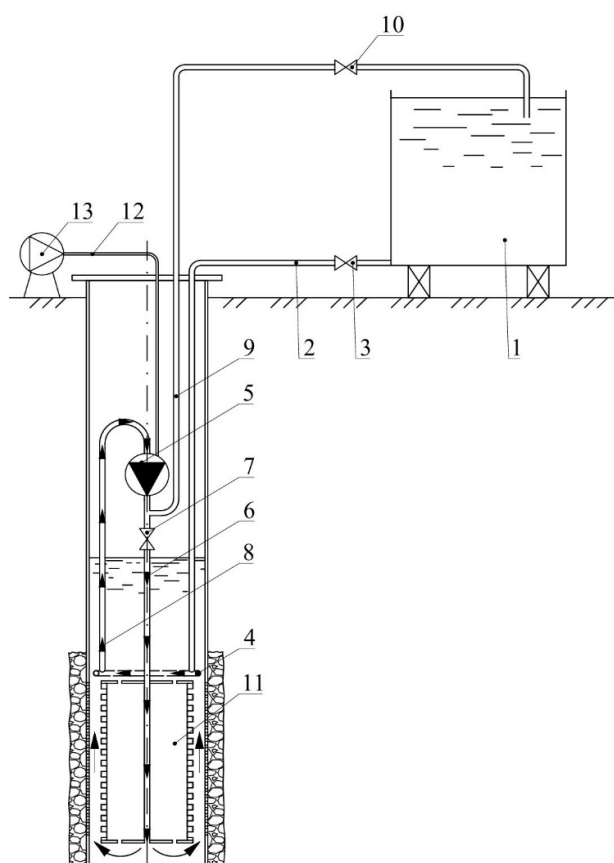


Рис. 2. Устройство для циркуляционно-реагентной обработки фильтров водозаборных скважин:

1 – емкость с реагентом; 2 – трубопровода для заливки реагента; 3 – запорный элемент; 4 – кольцевой дырчатый патрубок; 5 – мембранный насос; 6 – нагнетательный трубопровод; 7 – запорный элемент; 8 – всасывающий трубопровод; 9 – отводящий трубопровод; 10 – запорный элемент; 11 – гофрированная пластиковая труба; 12 – воздуховод; 13 – компрессор

Fig. 2. Installation for circulation-reagent treatment of water intake well filters:

1 – reagent tank; 2 – reagent filling pipeline; 3 – shut-off element; 4 – annular perforated pipe /perforated ring pipe; 5 – diaphragm pump; 6 – injection pipeline; 7 – shut-off element; 8 – suction pipeline; 9 – discharge pipeline; 10 – shut-off element; 11 – corrugated plastic pipe; 12 – air duct; 13 – compressor

Обработка фильтра и прифилтровой зоны. Открывают запорный элемент 3, и реагент по заливочному трубопроводу 2 поступает в кольцевой перфорированный патрубок 4, который обеспечивает равномерное распределение реагента на входе в верхнюю часть фильтра скважины.

За счет большего, чем у воды, удельного веса реагент движется вниз вдоль гофрированной пластиковой трубы 11 очищаемого фильтра и гравийной обсыпки и вытесняет воду в пласт.

Опорожнив емкость с реагентом 1, закрывают запорный элемент 3. При открытом запорном элементе 7 и закрытом запорном элементе 10 включают компрессор 13, который по воздуховоду 12 подает сжатый воздух в мембранный насос 5.

При работе мембранного насоса осуществляется непрерывная циркуляция реагента в системе «мембранный насос 5 – нагнетательный трубопровод 6 – фильтр скважины – кольцевой перфорированный патрубок 4 – всасывающий трубопровод 8 – мембранный насос 5».

Момент окончания процесса декольматации фильтра определяют по стабилизации электропроводности раствора. При необходимости отработанный раствор заменяют свежим реагентом и процесс регенерации повторяют.

Заключительные работы. После окончания процесса декольматации фильтра последовательно открывают и закрывают запорные элементы 10 и 7, после чего мембранным насосом 5 откачивают отработанный раствор со взвешенными частицами в емкость с реагентом 1 по отводящему трубопроводу 9.

Элемент для создания сопротивления в виде гофрированной пластиковой трубы, помещенный с кольцевым зазором внутрь очищаемого фильтра, имеет снаружи кольцевые выступы, которые создают в восходящем потоке раствора реагента дополнительную турбулизацию потока и поперечные вихри. Это улучшает процесс проникновения реагента в прифилтровую зону и гравийную обсыпку, интенсифицирует процесс растворения отложений и повышает эффективность декольматации.

Предложенная установка с мембранным насосом рекомендуется для скважин с внутренним диаметром от 200 мм и более в связи с минимальными размерами выпускаемых в настоящее время промышленностью пневматических мембранных насосов.

Методика расчета подачи мембранного насоса и скорости промывного потока реагента. Согласно технологической схеме обработки скважины (рис. 2), мембранный насос должен обеспечивать: 1) циркуляцию реагента в фильтре восстанавливаемой скважины с необходимой скоростью промывного потока; 2) подъем отработанного раствора после регенерации в емкость для последующей утилизации и прокачку скважины до чистой воды.

Чтобы правильно подобрать насос, необходимо рассмотреть его работу в двух эксплуатационных режимах.

Поддачи Q мембранного насоса в двух эксплуатационных режимах предлагается определять графически. По принятым значениям диаметров трубопроводов и их длин вычерчивается характеристика насосной установки $H_{н\text{уст}} = f(Q)$ на координатной плоскости. Подбор мембранного насоса осуществляется по каталогу. Паспортная характеристика $H_n = f(Q)$ мембранного насоса выбранной марки наносится на то же координатное поле, что и характеристика насосной установки $H_{н\text{уст}} = f(Q)$. Место пересечения характеристик насоса и насосной установки является рабочей точкой A , по координатам которой можно определить подачу $Q_{н\text{п}}$ и напор $H_{н\text{п}}$ мембранного насоса.

Режим циркуляционной обработки. Расчетная схема представлена на рис. 3. Осуществляется непрерывная циркуляция реагента в системе «мембранный насос – нагнетательный трубопровод – фильтр скважины – всасывающий трубопровод с кольцевым перфорированным патрубком на входе – мембранный насос».

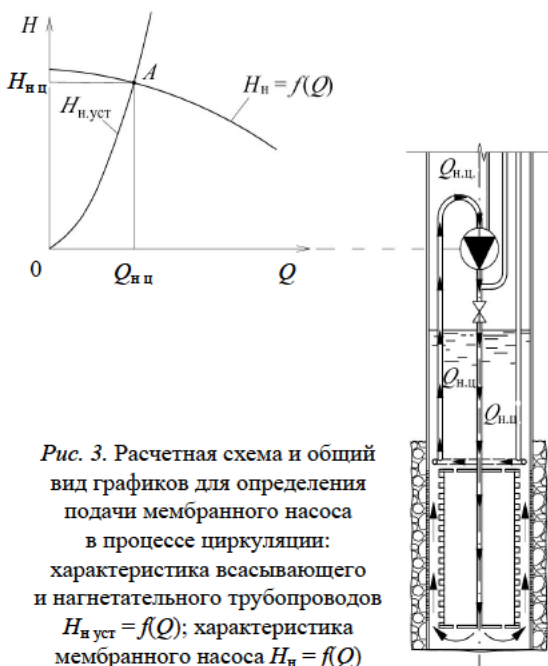


Рис. 3. Расчетная схема и общий вид графиков для определения подачи мембранного насоса в процессе циркуляции: характеристика всасывающего и нагнетательного трубопроводов $H_{н\text{уст}} = f(Q)$; характеристика мембранного насоса $H_n = f(Q)$

Fig. 3. Calculation diagram and general view of graphs for determining the supply of the diaphragm pump in circulation mode: the characteristics of the suction and injection pipelines, $H_{н\text{уст}} = f(Q)$; the characteristics of the diaphragm pump $H_n = f(Q)$

В данной расчетной схеме точка нагнетания находится на той же глубине, что и точка вса-

сывания. Из этого следует, что создаваемый насосом напор будет расходоваться на преодоление гидравлических сопротивлений. Требуемый напор насосной установки $H_{н\text{уст}} = f(Q)$ в процессе циркуляции равен сумме потерь напора в кольцевом перфорированном патрубке $h_{w\text{патр}}$, во всасывающем трубопроводе $h_{w\text{вс}}$, нагнетательном трубопроводе $h_{w\text{н}}$, а также суммарных потерь в элементе для создания сопротивления $\Sigma h_{эс}$

$$H_{н\text{уст}} = h_{w\text{патр}} + h_{w\text{вс}} + h_{w\text{н}} + \Sigma h_{эс}. \quad (1)$$

Суммарные потери $\Sigma h_{эс}$ равны

$$\Sigma h_{эс} = h_{эс\text{вх}} + h_{эс\text{м}} + h_{эс\text{дл}} + h_{эс\text{вых}}, \quad (2)$$

где $h_{эс\text{вх}}$ – потери напора на входе в элемент, создающий сопротивление; $h_{эс\text{м}}$ – местные потери напора элемента; $h_{эс\text{дл}}$ – потери напора по длине в элементе; $h_{эс\text{вых}}$ – то же на выходе из элемента, создающего сопротивление.

Величину потерь напора по длине в элементе $h_{эс\text{дл}}$ можно найти по формуле

$$h_{эс\text{дл}} = \zeta_{кз} \frac{l_{кз}}{d_3} \frac{v_{кз}^2}{2g}, \quad (3)$$

где $\zeta_{кз}$ – коэффициент гидравлического сопротивления трения при турбулентном течении в кольцевом канале с шероховатостью в виде прямоугольных выступов на поверхности внутренней трубы, который приблизительно может быть рассчитан по формуле [19]

$$\zeta_{кз} = \left(0,053 + 1,85 \frac{k}{d_3} \right) \text{Re}^{-0,07},$$

где k – высота прямоугольного выступа; $d_3 = d_\phi - d_{гк}$ – эквивалентный диаметр зазора кольцевого канала (рис. 4); d_ϕ – внутренний диаметр фильтра; $d_{гк}$ – наружный диаметр гофрированной колонны труб с учетом шероховатости; d_3 – определяющий диаметр при нахождении числа Рейнольдса.

Потери напора на входе в элемент для создания сопротивления $h_{эс\text{вх}}$ приблизительно могут быть найдены по рекомендациям, приведенным в [19, с. 274].

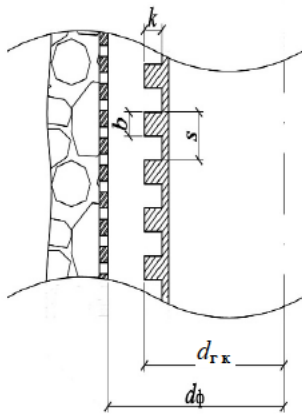


Рис. 4. Линейные размеры кольцевого канала и элементов регулярной шероховатости с прямоугольными выступами:
k – высота шероховатости; *b* – ее ширина; *s* – ее шаг

Fig. 4. Linear dimensions of the annular channel and elements of regular roughness with rectangular protrusions:
k – roughness height; *b* – roughness width;
s – roughness pitch

Тогда выражение (1) с учетом (2) и (3) примет вид

$$\begin{aligned}
 H_{\text{н уст}} &= h_{\text{патр вх}} + h_{\text{патр180}} + h_{\text{тр}} + h_{\text{патр}} + h_{\text{вс дл}} + \\
 &+ h_{\text{н тр}} + h_{\text{в}} + h_{\text{н дл}} + \sum h_{\text{эс}} = \\
 &= \left(\left(\frac{\zeta_{\text{патр вх}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{патр180}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{тр}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{н тр}}}{\omega_{\text{н}}^2} + \frac{\zeta_{\text{в}}}{\omega_{\text{н}}^2} + \zeta_{\text{кз}} \times \right. \right. \\
 &\times \frac{l_{\text{кз}}}{d_3 \left(\pi (d_{\phi}^2 - d_{\text{Гк}}^2) \right)^2} + \left. \frac{\zeta_{\text{кп}}}{\left(\pi (d_{\phi}^2 - d_{\text{Гк}}^2) \right)^2} \right) \times \\
 &\times \frac{1}{2g} + A_{\text{патр}} l_{\text{патр}} + A_{\text{вс}} l_{\text{вс}} + A_{\text{н}} l_{\text{н}} \Big) Q^2,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $h_{\text{патр вх}}$ – потери напора на входе в кольцевой перфорированный патрубок; $h_{\text{патр180}}$ – то же в кольцевой перфорированный патрубок при плавном повороте на 180°; $h_{\text{патр тр}}$ – то же в тройнике при соединении кольцевого перфорированного патрубка со всасывающим трубопроводом; $h_{\text{н дл}}$ – то же по длине в патрубке; $h_{\text{вс дл}}$ – то же по длине всасывающего трубопровода; $h_{\text{н дл}}$ – то же по длине нагнетательного трубопровода; $h_{\text{н тр}}$ – то же в тройнике нагнетательного трубопровода при отсутствии потока в ответвлении; $h_{\text{в}}$ – то же при прохождении потоком вентиля конструкции «Косва»;

$\zeta_{\text{патр вх}}, \zeta_{\text{патр180}}, \zeta_{\text{патр тр}}, \zeta_{\text{н тр}}, \zeta_{\text{в}}$ – коэффициенты соответствующих местных сопротивлений; $\omega_{\text{патр}}, \omega_{\text{вс}}, \omega_{\text{н}}$ – площади поперечных сечений патрубка, всасывающего и нагнетательного трубопроводов; $A_{\text{патр}} l_{\text{патр}}, A_{\text{вс}} l_{\text{вс}}, A_{\text{н}} l_{\text{н}}$ – удельные сопротивления и длины патрубка, всасывающего трубопровода и нагнетательного трубопровода соответственно.

Поскольку кольцевой перфорированный патрубок питается по всей длине, расход по его длине меняется. В точке подключения к всасывающему трубопроводу он максимален и равен Q , а в диаметрально противоположной точке близок к нулю. В формулах (1), (6) и (8) этой неравномерностью расхода пренебрегаем для упрощения расчетов, как и потерями напора во всасывающем и нагнетательном патрубках мембранного насоса, ввиду их малости.

Скорость промывного потока реагента в концентрическом кольцевом канале на внутренней поверхности фильтра определим по формуле

$$v_{\text{п.п.к.к}} = \frac{Q_{\text{н.ц.}}}{\omega_{\text{к.к}}} = \frac{4Q_{\text{н.ц.}}}{\pi(d_{\phi}^2 - d_{\text{Гк}}^2)}, \tag{5}$$

где $\omega_{\text{к.к}}$ – площадь живого сечения концентрического кольцевого канала; d_{ϕ} – внутренний диаметр фильтра; $d_{\text{Гк}}$ – наружный диаметр гофрированной колонны труб.

Режим откачки отработанного раствора. Расчетная схема и общий вид графиков для определения подачи мембранного насоса в бак представлены на рис. 5. Насос подает жидкость из фильтра по отводящему трубопроводу в емкость.

Характеристика насосной установки реагентного насоса представляет собой зависимость от расхода жидкости при движении воды во всасывающем и нагнетательном трубопроводах мембранного насоса. Определяется как сумма геодезической высоты подъема $H_{\text{геом}}$ и потерь напора в водопроводящих линиях

$$H_{\text{н.уст}} = H_{\text{геом}} + \sum h, \tag{6}$$

где $H_{\text{геом}}$ – геодезическая высота подъема, равная разности уровней воды в емкости для реагента и в скважине, м; $\sum h = h_{\text{w пат}} + h_{\text{w вс}} + h_{\text{w н}}$ – суммарные потери напора, которые равны потерям в кольцевом перфорированном патрубке, всасывающем и нагнетательном трубопроводах,

$$\sum h = h_{w\text{патр}} + h_{w\text{вс}} + h_{w\text{н}} = h_{\text{патр вх}} + h_{\text{патр180}} + h_{\text{патр тр}} + h_{\text{патр дл}} + h_{\text{вс дл}} + h_{\text{н дл}} + h_{\text{н тр 90}} + h_{\text{н 90}} + h_{\text{н вых}} =$$

$$= \left(\left(\frac{\zeta_{\text{патр вх}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{патр180}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{патр тр}}}{\omega_{\text{вс}}^2} + \frac{\zeta_{\text{н тр 90}}}{\omega_{\text{н}}^2} + \frac{\zeta_{\text{н 90}}}{\omega_{\text{н}}^2} + \frac{\zeta_{\text{н вых}}}{\omega_{\text{н}}^2} \right) \cdot \frac{1}{2g} + A_{\text{патр}} l_{\text{патр}} + A_{\text{вс}} l_{\text{вс}} + A_{\text{н}} l_{\text{н}} \right) Q^2, \quad (7)$$

$h_{\text{н тр 90}}$ – потери напора в тройнике нагнетательного трубопровода при ответвлении потока на 90° ; $h_{\text{н 90}}$ – то же в нагнетательном трубопроводе при плавном повороте на 90° ; $h_{\text{н вых}}$ – то же при выходе из нагнетательного трубопровода в резервуар; $\zeta_{\text{патр вх}}$, $\zeta_{\text{патр180}}$, $\zeta_{\text{тр}}$, $\zeta_{\text{н тр 90}}$, $\zeta_{\text{н 90}}$, $\zeta_{\text{н вых}}$ – коэффициенты соответствующих местных сопротивлений.

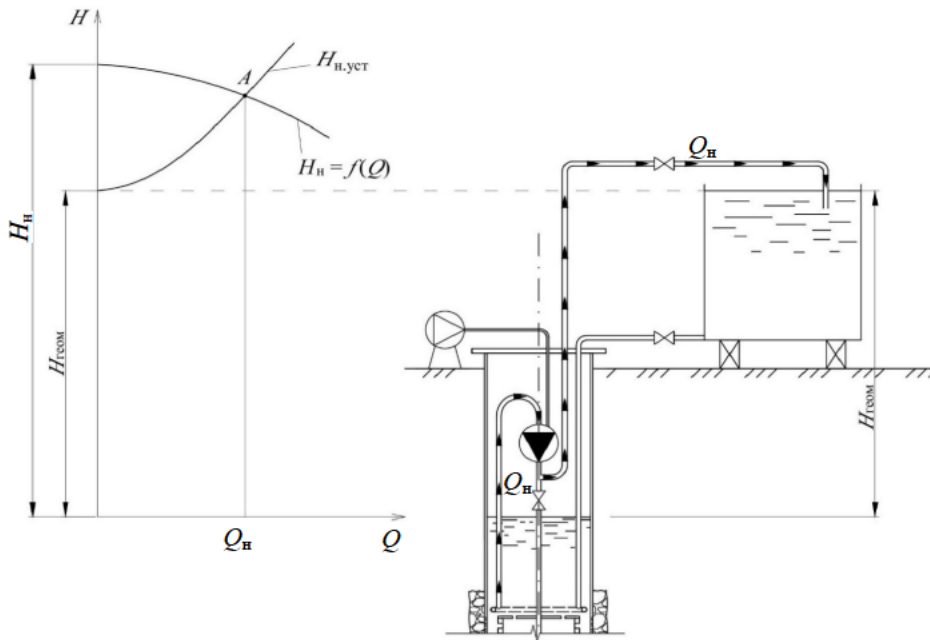


Рис. 5. Расчетная схема и общий вид графиков для определения подачи мембранного насоса в бак: характеристика всасывающего и отводящего трубопроводов $H_{\text{н тр}} = f(Q)$; характеристика мембранного насоса $H_{\text{н}} = f(Q)$

Fig. 5. Calculation diagram and general view of graphs for determining the supply of the diaphragm pump into a tank: the characteristics of the suction and discharge pipelines, $H_{\text{н тр}} = f(Q)$; the characteristics of the diaphragm pump $H_{\text{н}} = f(Q)$

Следующим шагом является проверка всасывающего трубопровода насоса на кавитацию. Расчет проверки бескавитационного режима работы насоса сводится к сравнению двух величин: доступного кавитационного запаса системы ($NPSH_a$) и требуемого кавитационного запаса насоса ($NPSH_r$). Условием бескавитационной работы является выполнение неравенства: $NPSH_a > NPSH_r$. $NPSH_a$ можно вычислить по формуле

$$NPSH_a = \frac{p_a}{\rho g} - H_{\text{вс}} - \frac{p_p}{\rho g} - (h_{w\text{вс}} + h_{w\text{патр}}), \quad (8)$$

где p_a – давление на поверхности воды в скважине; $H_{\text{вс}}$ – геометрическая высота всасыва-

ния; p_p – давление насыщенных паров жидкости.

Проведем вычисление

$$h_{w\text{вс}} + h_{w\text{патр}} = h_{\text{патр вх}} + h_{\text{патр180}} + h_{\text{тр}} + h_{\text{вс дл}} =$$

$$= \left(\left(\frac{\zeta_{\text{патр вх}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{патр180}}}{\omega_{\text{патр}}^2} + \frac{\zeta_{\text{тр}}}{\omega_{\text{н}}^2} \right) \times \right. \quad (9)$$

$$\left. \times \frac{1}{2g} + A_{\text{патр}} l_{\text{патр}} + A_{\text{вс}} l_{\text{вс}} \right) Q^2.$$

Если условие $NPSH_a > NPSH_r$ не выполняются, то следует увеличить диаметр всасывающего трубопровода, что уменьшит скорости в нем, а соответственно и потери напора.

Пример расчета. Исходные данные: глубина скважины $H_{ск} = 40$ м; наружные диаметры обсадной колонны и каркаса фильтра равны 219 мм, тогда при толщине стенок 8 мм их внутренние диаметры $d_k = d_\phi = 203$ мм; длина фильтра $l_\phi = 10$ м; глубина статического уровня $H_{ст} = 18,0$ м; высота бака $H_б = 1,2$ м (т. е. $H_T = 19,2$ м), насос смонтирован на высоте 1 м от статического уровня воды в скважине (длина всасывающего трубопровода 5 м, а нагнетательного 18,2 м). В качестве трубопроводов принимаем пластиковые полиэтиленовые трубы (ГОСТ 18599–2001) с наружным диаметром 25 мм и расчетным внутренним диаметром $d_n = 0,0166$ м ($A = 984900$ c^2/m^6) [20, табл. 1.14]. Коэффициенты местных сопротивлений и их значения: $\zeta_{патр\ вх} = 5$ [21, с. 43]; $\zeta_{патр180} = 0,3$, $\zeta_{н\ 90} = 0,22$ [21, с. 41]; $\zeta_{патр\ тр} = 5$, $\zeta_{н\ тр90} = 1,5$, $\zeta_{н\ тр} = 1,0$ [19]; $\zeta_{вых} = 1$ [21, с. 40]; $\zeta_\nu = 2,5$ [22, табл. 3.33]. В качестве насосного агрегата принимаем пневматический насос с двойной мембраной Yartek YT030 SS316 (корпус из нержавеющей стали) производителя SEKO S.P.A. (Италия).

Расчет режима циркуляционной обработки. Элемент для создания сопротивления – гофрированная колонна. В качестве основы для элемента, создающего сопротивление, принимается гофрированная полиэтиленовая двустенная труба КОРСИС DN 200/176 SN 8.

Тогда потери насоса при режиме циркуляции по формуле (4) составят

$$\begin{aligned}
 H_{н\ уст} = & \left(\left(\frac{5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{0,3}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{2,5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{1}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{2,5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \left(0,053 + 1,85 \frac{11,6}{0,09} \right) 18900^{-0,07} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \frac{10}{0,088 \left(3,14 (0,203^2 - 0,194^2) \right)^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{0,4}{\left(3,14 (0,203^2 - 0,194^2) \right)^2} \right) \times \right. \\
 & \left. \times \frac{1}{2 \cdot 9,81} + 984900 \cdot 0,3 + 984900 \cdot 11 + 984900 \cdot 21 \right) \times \\
 & \times Q^2 = 49629393 Q^2 \text{ (м)}.
 \end{aligned}$$

В системе координат строим характеристику трубопровода $H_{н\ уст}$ и паспортную характеристику насоса $H_n = f(Q)$ (рис. 6), определяем рабочую точку A : $H_{н\ ц} = 15,24$ м; $Q_{н\ ц} = 33,30$ л/мин.

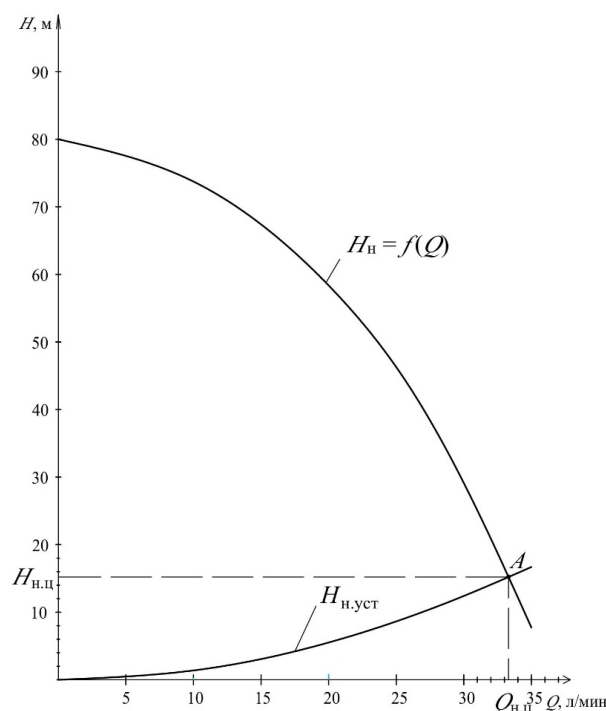


Рис. 6. Характеристики совместной работы насоса и трубопроводов в циркуляционном режиме $H_{н\ уст} = f(Q)$; $H_n = f(Q)$ – мембранного насоса Yartek YT030 SS316

Fig. 6. Characteristics of the joint operation of the pump and the pipelines in circulation mode $H_{н\ уст} = f(Q)$; $H_n = f(Q)$ of the diaphragm pump Yartek YT030 SS316

Далее определяем скорость $v_{к\ к}$ промывного потока реагента в концентрическом кольцевом канале на внутренней поверхности фильтра по формуле

$$\begin{aligned}
 v_{п\ п\ к\ к} &= \frac{Q_{н\ ц}}{\omega_{к\ к}} = \frac{4Q_{н\ ц}}{\pi(d_\phi^2 - d_{г\ к}^2)} = \\
 &= \frac{4 \cdot 0,00056}{3,14(0,203^2 - 0,194^2)} = 0,20 \text{ (м/с)}.
 \end{aligned}$$

Расчет режима откачки отработанного раствора. Используя формулу (7), находим выражение для определения требуемого напора $H_{н\ тр}$

$$\begin{aligned}
 H_{н\ уст} &= H_{г} + \left(\left(\frac{\zeta_{патр\ вх}}{\omega_{патр}^2} + \frac{\zeta_{патр180}}{\omega_{патр}^2} + \frac{\zeta_{гр}}{\omega_{н}^2} + \frac{\zeta_{н\ гр\ 90}}{\omega_{н}^2} + \frac{\zeta_{н\ 90}}{\omega_{н}^2} + \frac{\zeta_{н\ вых}}{\omega_{н}^2} \right) \times \right. \\
 &\quad \left. \times \frac{1}{2g} + A_{патр} l_{патр} + A_{вс} l_{вс} + A_{н} l_{н} \right) Q^2 = \\
 &= 19,2 + \left(\left(\frac{5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{0,3}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{2,5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{1,5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{0,22}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{1}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} \right) \frac{1}{2g} + 984900 \cdot 0,3 + 984900 \cdot 11 + 984900 \cdot 18,2 \right) Q^2 = \\
 &= 19,2 + 40513507 Q^2 \text{ (м)}.
 \end{aligned}$$

В системе координат строим характеристику трубопровода $H_{н\ уст}$ и паспортную характеристику насоса $H_{н} = f(Q)$ (рис. 7), определяем рабочую точку A : $H_A = 29,38$ м; $Q_A = 29,93$ л/мин.

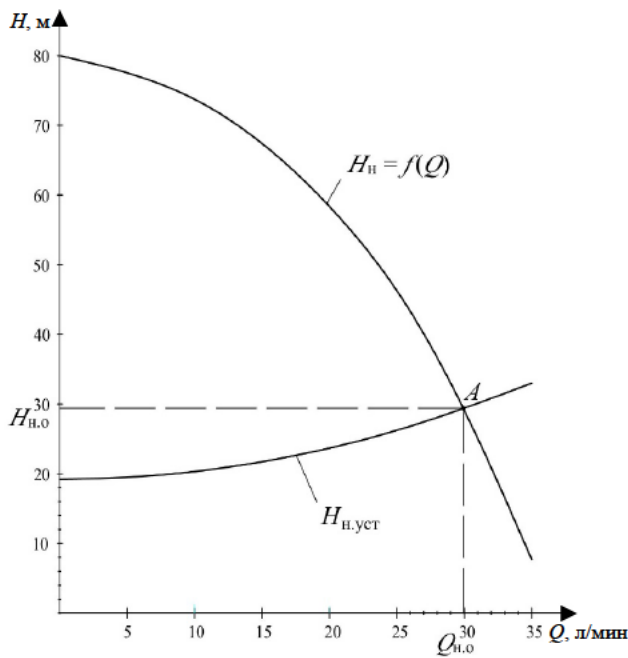


Рис. 7. Характеристика совместной работы насоса и трубопроводов в режиме откачки $H_{н\ уст} = f(Q)$; $H_{н} = f(Q)$ мембранного насоса Yartek YT030 SS316

Fig. 7. Characteristics of the joint operation of the pump and the pipelines in pumping out mode $H_{н\ уст} = f(Q)$; $H_{н} = f(Q)$ of the diaphragm pump Yartek YT030 SS316

Проверка условий кавитационного запаса.

Используя формулу (9), находим потери напора

во всасывающей линии, а затем найденные потери напора подставляем в формулу (8)

$$\begin{aligned}
 h_{w\ вс} + h_{w\ пат} &= \left(\left(\frac{5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \frac{0,3}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{2,5}{(0,785 \cdot 0,0166^2)^2} \right) \times \frac{1}{2g} + 984900 \cdot 0,3 + 984900 \cdot 5 \right); \\
 Q^2 &= 13716155 \cdot 0,0004488^2 = 2,76 \text{ (м)}; \\
 NPSH_a &= 10 - 1 - 0,23 - 2,76 = 6,01 \text{ (м)}.
 \end{aligned}$$

После этого проверяем условие $NPSH_a > NPSH_r$, подставив найденное значение доступного кавитационного запаса системы ($NPSH_a$) и требуемого кавитационного запаса насоса ($NPSH_r$):

$$6,01 \text{ м} > 5 \text{ м}.$$

Выполнение условия свидетельствует о том, что трубопроводы подобраны правильно, а кавитация отсутствует.

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Проведенные расчеты подтвердили, что выбранный насос обладает необходимым запасом производительности и мощности для двух режимов эксплуатации, что гарантирует эффективность работы установки в каждом из них, а полученные скорости промывного потока реагента на внутренней поверхности фильтра скважины способны индуцировать фильтраци-

онный поток реагента в гравийной обсыпке и обеспечить смыв и растворение кольматирующих отложений.

Таблица 1

Характеристики работы установки
для скважины глубиной 40 м

Specifications of a 40-meter deep well installation

Насос Yartek YT0030 SS316				
Режим циркуляции			Режим откачки	
Q , л/мин	H , м	v , м/с (кольцевой зазор)	Q , л/мин	H , м
33,30	15,24	0,20	29,93	29,38

В случае скважины с фильтровой колонной диаметром 273 мм возможно использование более производительных насосов, например Argal DDE SPN 60 (Италия) с производительностью до 76 л/мин. При этом скорость потока возрастет до 0,4 м/с.

ВЫВОДЫ

1. Предложена конструкция установки для циркуляционно-реагентной обработки фильтров водозаборных скважин, которая достаточно проста в технической реализации и может быть применена в скважинах с различной глубиной установки фильтра. Она позволит сократить затраты на электроэнергию благодаря применению мембранного насоса, обладающего более высоким КПД по сравнению с установками, включающими в своей конструкции струйные и эрлифтовые водоподъемники. Применение мембранного насоса расширяет область применяемых реагентов, включая кислородочувствительные составы (дитионит натрия), он пригоден для перекачки сред, содержащих взвешенные твердые частицы. Автоматизация процесса циркуляции позволяет минимизировать вмешательство персонала, что снижает трудоемкость операций по обработке скважин и уменьшает влияние человеческого фактора на качество проводимых работ.

2. Разработана расчетная схема движения жидкости для двух эксплуатационных режимов: непрерывной циркуляции реагента («мембранный насос – нагнетательный трубопровод – фильтр скважины – всасывающий трубопро-

вод – мембранный насос»); откачки отработанного раствора из скважины в бак (всасывающий трубопровод – мембранный насос – нагнетательный трубопровод).

3. Предложена методика гидравлического расчета параметров промывного потока и подбора технологического оборудования установки регенерации скважин, которая предусматривает решение системы уравнений графоаналитическим методом. Методика позволяет получить значения циркуляционного расхода и промывной скорости в зависимости от величины статического уровня воды в скважине, геометрических размеров фильтра скважины и трубопроводов, а также элемента, создающего сопротивление.

ЛИТЕРАТУРА

- Price, M. Well Development and Rehabilitation Methods / M. Price // Water Well Journal. 20 March 2025. URL: <https://waterwelljournal.com/well-development-and-rehabilitation-methods/> (date of access: 22.12.2025).
- Make a well pour more water // Water Well Aid. URL: <https://waterwellaid.com/cleaning/> (date of access: 22.12.2025).
- Bruni, M. Well Development & Rehabilitation / M. Bruni, D. Spuhler // SSWM University Course. – URL: <https://sswm.info/pt-pt/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-sources-hardware/well-development-%26-rehabilitation> (date of access: 22.12.2025).
- Water Well Maintenance and Rehabilitation // PennState Extension. 26 August 2022. URL: <https://extension.psu.edu/water-well-maintenance-and-rehabilitation> (date of access: 22.12.2025).
- New developed bi-rotational-unit significantly increases results of water well rehabilitations using the HPI-Process with high water pressure. Etschel brunnenservice, 2021. URL: <https://etbs.de/wp-content/uploads/2023/02/Energie-Wasser-Praxis-02-2021-EN.pdf> (date of access: 11.10.2025).
- Baron, D. High-Pressure Impulses for Well Development and Rehabilitation / D. Baron, L. R. Etschel // Water Well Journal. December 2023. URL: <https://etbs.de/wp-content/uploads/2024/01/high-pressure-impulses-for-well-development-and-rehabilitation.pdf> (date of access: 15.10.2025).
- Patent US 4349073, Int. Cl E21B 37/00, E21B 37/06. Hydraulic jet well cleaning: № 195303; filing date 07.10.1980; publ. date 14.09.1982 / Casper W. Zublin. URL: https://paten-timages.storage.googleapis.com/67/ba/25/46_2aa2e2002762/US4349073.pdf (date of access: 20.12.2025).
- Тесля, В. Г. Циркуляционная регенерация скважин и пласта: дис. канд. техн. наук: 04.00.06 / Тесля Валерий Григорьевич; ВНИИ водоснабжения, канализации,

- гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. М., 1986. 144 с.
9. Ивашечкин, В. В. Регенерация скважин и напорных фильтров систем водоснабжения / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, А. Н. Кондратович; под ред. В. В. Ивашечкина. Минск: БНТУ, 2008. 276 с.
 10. Patent US 3945436 A, Int. Cl E21B 33/124, E21B 33/127, E21B 43/24. Method and apparatus for cleaning well liner and adjacent formation: № 39111: filing date 07.01.1975: publ. date 23.03.1976 / R. Nebolsine. URL: <https://patents.google.com/patent/US3945436A/en?q=US+3945436> (date of access: 01.03.2025).
 11. Патент SU 1182129 А, МПК E21B 37/06 (2006.01), E03B 3/18 (2006.01), E21B 43/22 (2006.01). Устройство для циркуляционной обработки скважин на воду: № 3721443/23-26: заявлено 02.02.1984: опубл. 30.09.1985 / В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, В. Г. Тесля; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский ин-т канализации, водоснабжения, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии. 3 с.
 12. Патент BY 21422, МПК E03B 3/15 (2006.01). Устройство для реагентной обработки скважины: № а 20140394: заявлено 16.07.2014: опубл. 30.10.2017 / В. В. Ивашечкин, А. Н. Курч, Ю. С. Машук, И. Е. Иванова; заявитель Белорусский национальный технический университет. 3 с.
 13. Патент BY 10296, МПК E21B 43/00 (2006), E03B 3/00 (2006). Устройство для реагентной обработки скважины: № а 20051082: заявлено 09.11.2005: опубл. 28.02.2008 / И. А. Герасименко, Ан. М. Шейко, В. В. Ивашечкин, Ал. М. Шейко; заявитель Белорусский национальный технический университет. 4 с.
 14. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 334 с.
 15. Ивашечкин, В. В. Ремонтпригодные водозаборные скважины / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко; под ред. В. В. Ивашечкина. Минск: БНТУ, 2016. 228 с.
 16. Романенко, В. А. Восстановление производительности водозаборных скважин / В. А. Романенко, Э. М. Вольницкая. Л.: Недра, 1986. 112 с.
 17. Реагентная регенерация водозаборных скважин с помощью струйных насосных установок / В. В. Ивашечкин, А. А. Артемчик, Ю. А. Медведева, А. М. Шейко // Наука и техника. 2025. № 6. С. 467–478. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-467-478>
 18. Руководство по безопасности. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем: РБ-075-12: введ. в действие с 31 авг. 2012 г. / Федер. служба по эколог., технолог. и атом. надзору. М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2012. 112 с. (Руководства по безопасности в области использования атомной энергии).
 19. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
 20. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. 8-е изд., доп. М.: Бастет, 2007. 351 с.
 21. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альштуль, Н. В. Данильченко [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1972. 238 с.
 22. Курганов, А. М. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: справ. / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. 3-е изд. Л.: Стройиздат; Ленингр. отделение, 1986. 440 с.

Поступила 20.11.2025

Подписана в печать 27.01.2026

Опубликована онлайн 31.03.2026

REFERENCES

1. Price M. (20 March 2025) Well Development and Rehabilitation Methods. *Water Well Journal*. Available at: <https://waterwelljournal.com/well-development-and-rehabilitation-methods/> (accessed 22 December 2025).
2. Make a Well Pour More Water. *Water Well Aid*. Available at: <https://waterwellaid.com/cleaning/> (accessed 22 December 2025).
3. Bruni M., Spuhler D. Well Development & Rehabilitation. *SSWM University Course*. Available at: <https://sswm.info/pt-pt/sswm-university-course/module-4-sustainable-water-supply/further-resources-water-sources-hardware/well-development-%26-rehabilitation> (accessed 22 December 2025).
4. Water Well Maintenance and Rehabilitation. *PennState Extension*. (26 August 2022). Available at: <https://extension.psu.edu/water-well-maintenance-and-rehabilitation> (accessed 22 December 2025).
5. *New Developed Bi-Rotational-Unit Significantly Increases Results of Water Well Rehabilitations Using the HPI-Process with High Water Pressure*. Etschel Brunnenservice, 2021. Available at: <https://etbs.de/wp-content/uploads/2023/02/Energie-Wasser-Praxis-02-2021-EN.pdf> (accessed 11 October 2025).
6. Baron D., Etschel L. R. (December 2023) High-Pressure Impulses for Well Development and Rehabilitation. *Water Well Journal*. Available at: <https://etbs.de/wp-content/uploads/2024/01/high-pressure-impulses-for-well-development-and-rehabilitation.pdf> (accessed 11 October 2025).
7. Zublin C. W. (1982) *Hydraulic jet well cleaning*. Patent US 4349073. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/67/ba/25/462aa2e2002762/US4349073.pdf> (accessed 20 December 2025).
8. Teslya V. G. (1986) *Circulation Regeneration of Wells and Formations* [Dissertation]. Moscow (in Russian).
9. Ivashechkin V. V., Sheyko A. M., Kondratovich A. N. (2008) *Regeneration of Wells and Pressure Filters of Water Supply Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University. 276 (in Russian).

10. Nebolsine R. (1976) *Method and Apparatus for Cleaning Well Liner and Adjacent Formation*: Patent US 3945436 A. Available at: <https://patents.google.com/patent/US3945436A/en?q=US+3945436> (accessed 01 March 2025) (in Russian).
11. Alekseev V. S., Kommunar G. M., Teslya V. G. (1985) *Device for Circulation Treatment of Water Wells*. Patent SU 1182129 A (in Russian).
12. Ivashechkin V. V., Kurch A. N., Mashuk Yu. S., Ivanova I. E. (2017) *Device for Reagent Treatment of a Well*. Patent BY 21422 (in Russian).
13. Gerasimyonok I. A., Sheyko An. M., Ivashechkin V. V., Sheyko Al. M. (2008) *Device for Reagent Treatment of a Well*. Patent BY 10296 (in Russian).
14. Gavrilko V. M. Alekseev V. S. (1985) *Drill Hole Filters*. 3rd ed. Moscow, Nedra Publ. 334 (in Russian).
15. Ivashechkin V. V., Avtushko P. A. (2016) *Repairable Water Intake Wells*. Minsk, Belarusian National Technical University. 228 (in Russian).
16. Romanenko V. A., Volnitskaya E. M. (1986) *Restoring the Productivity of Water Intake Wells*. Leningrad, Nedra Publ. 112 (in Russian).
17. Ivashechkin V. V., Artemchik A. A., Medvedeva J. A., Sheiko A. M. (2025) Reagent Regeneration of Water Intake Wells Using Jet Pumping Units. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 24 (6), 467–478 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-467-478>
18. RB-075-12. *Safety Guide. Calculation Ratios and Methods for Calculating the Hydrodynamic and Thermal Characteristics of Elements and Equipment of Nuclear Power Plants with Liquid Metal Coolant*. Moscow, Federal Budgetary Institution “Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety”, 2012. 112 (in Russian).
19. Idelchik I. E. (1992) *Handbook of Hydraulic Resistance*. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 672 (in Russian).
20. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2007) *Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes*. 8th ed. Moscow, Bastet Publ. 351 (in Russian).
21. Kiselev P. G., Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A. (1972) *Handbook of Hydraulic Calculations*. 4th ed. Moscow, Energiya Publ. 238 (in Russian).
22. Kurganov A. M., Fyodorov N. F. (1986) *Hydraulic Calculations of Water Supply and Sanitation Systems: Reference Book*. 3rd ed. Leningrad, Stroyizdat Publ., Leningrad Branch. 440 (in Russian).

Received: 20.11.2025

Accepted: 27.01.2026

Published online: 31.03.2026