

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-467-478>

УДК 628.112

Реагентная регенерация водозаборных скважин с помощью струйных насосных установок

Докт. техн. наук, проф. В. В. Ивашечкин¹⁾, асп. А. А. Артёмчик¹⁾,
канд. техн. наук Ю. А. Медведева¹⁾, канд. техн. наук А. М. Шейко²⁾

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

²⁾ОАО «Белгорхимпром» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье приведены три варианта схем установок для циркуляционно-реагентной обработки фильтров водозаборных скважин, которые позволяют применять как жидкие, так и порошкообразные реагенты. Основными элементами установок являются: емкость с реагентом, один или два реагентных насоса, подсоединенных последовательно, система трубопроводов, струйный насос, установленный под уровнем жидкости в скважине, гофрированная пластиковая труба, помещенная с кольцевым зазором внутрь очищаемого фильтра. Задача технологического оборудования – создание адресной циркуляции реагента снаружи гофрированной трубы в фильтре и прифильтровой зоне скважины, снизившей дебит. Это обеспечивает эффективную и равномерную обработку фильтра, уменьшает объемы миграции реагента в водоносный пласт. Разработана расчетная схема движения реагента в системе «емкость с реагентом – фильтр – водоподъемная колонна – струйный насос – емкость с реагентом», составлена система уравнений движения реагента. Описана методика расчета системы уравнений графоаналитическим методом, позволяющая получить значения циркуляционного расхода и промывной скорости в концентрическом кольцевом канале между внутренними поверхностями фильтра и гофрированной пластиковой трубы, а также подобрать параметры технологического оборудования установки для обработки скважины с заданной глубиной и положением статического уровня воды. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: водозаборная скважина, гидроэлеватор, струйный насос, реагентный насос, химическая кольматация, декольматация, регенерация, циркуляционно-реагентная обработка

Для цитирования: Реагентная регенерация водозаборных скважин с помощью струйных насосных установок / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 6. С. 467–478. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-467-478>

Reagent Regeneration of Water Intake Wells Using Jet Pumping Units

V. V. Ivashechkin¹⁾, A. A. Artemchik¹⁾, J. A. Medvedeva¹⁾, A. M. Sheiko²⁾

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

²⁾Belgorkhimprom JSC (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents three variants of installation schemes for circulating-reagent treatment of water intake well screens, which allow to use both liquid and powder reagents. The main components of the installations are: a reagent tank, one or two reagent pumps connected in series, a pipeline system, a jet pump installed under the liquid level in the water intake well, and a corrugated plastic pipe placed with an annular gap inside the screen being cleaned. The task of the process equipment is to create targeted circulation of the reagent outside the corrugated pipe in the screen and near-screen zone

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

of the well that has reduced the flow rate. This ensures efficient and uniform processing of the screen, reduces the volume of reagent migration into the aquifer. A calculation scheme for reagent movement in the system (reagent tank – screen – riser pipe – jet pump – reagent tank) has been developed. A system of equations for reagent movement has been compiled. The paper describes a methodology for calculating a system of equations using a graph-analytical method, which allows one to obtain the values of the circulation flow rate and flushing speed in a concentric annular channel between the internal surfaces of a screen and a corrugated plastic pipe. The methodology also allows to select the parameters of the technological equipment of the installation for processing water intake wells with a given depth and position of the static water level. An example of calculation is given.

Keywords: water intake well, hydraulic elevator, jet pump, reagent pump, chemical mudding, decolmatation, regeneration, circulation-reagent treatment

For citation: Ivashechkin V. V., Artemchik A. A., Medvedeva J. A., Sheiko A. M. (2025) Reagent Regeneration of Water Intake Wells Using Jet Pumping Units. *Science and Technique*. 24 (6), 467–478. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-467-478> (in Russian)

Введение

Опыт эксплуатации водозаборных скважин показывает, что с течением времени их удельная производительность неизбежно снижается ввиду колюматации фильтров и роста их гидравлического сопротивления, что приводит к повышению себестоимости добываемой воды.

Анализ существующих методов циркуляционно-реагентной регенерации [1–8] показал, что они не в полной мере обеспечивают равномерную деколюматацию отверстий водопримной поверхности гравийного фильтра по всей его высоте и их характеризуют значительные утечки реагента в водоносный пласт. Наиболее загрязненные участки остаются неочищенными ввиду преимущественной циркуляции реагента по наиболее проницаемым каналам, минуя заколюматированные участки. Вышеназванные недостатки в большей степени присущи установкам циркуляционно-реагентной регенерации с применением пакера для разделения фильтровой колонны на две секции (закачную и откачную [3]) и в меньшей степени – более сложным многопакерным схемам [3, 4, с. 21; 4, с. 24; 4 с. 22; 5; 7; 8]. Многопакерные схемы увеличивают равномерность распределения реагента, но им также свойственно разбавление реагента, хоть и в меньшей степени. Кроме того, они отличаются сложной конструкцией.

Установки, в конструкции которых предлагается использовать осевой насос для интенсификации растворения колюматирующих отложений [4, с. 22–24], могут быть использованы только в скважинах, эксплуатирующихся непродолжительный период при незначительном количестве колюматанта, находящегося в пастообразном и рыхлом состоянии.

С целью снижения степени разбавления реагента и обеспечения его направленной вертикальной циркуляции в заколюматированном фильтре с гравийной обсыпкой в работе [6] предложена схема установки с размещением в нем набора негерметичных дисков по всей его высоте, в которой циркуляция реагента осуществляется с помощью эрлифта. Однако использование эрлифта в качестве устройства для создания циркуляции [3, 6] исключает возможность применения порошкообразного дитионита натрия из-за поглощения им кислорода из подаваемого в эрлифт воздуха и снижения величины окислительно-восстановительного потенциала раствора, что ограничивает область применения оборудования.

Исходя из этого представляет интерес создание направленной вертикальной циркуляции реагента в фильтре скважины с помощью струйного насоса, не имеющего ограничений по типам применяемых реагентов и обладающего высокой надежностью, так как он не имеет движущихся частей и способен перекачивать жидкости с большим содержанием взвешенных частиц.

Поэтому целью исследования является разработка схем и методик расчета реагентной регенерации водозаборных скважин с помощью струйных насосных установок.

Результаты и обсуждения

Теоретические основы работы струйных аппаратов изложены в [9–17]. В работе [18] приведен расчет геометрических размеров гидроэлеватора и параметров оборудования гидроэлеваторной установки с гидромониторным трубопроводом для удаления песчаных пробок из одноколонных скважин глубиной до 40 м.

На рис. 1 представлена схема движения жидкости при работе струйного насоса.

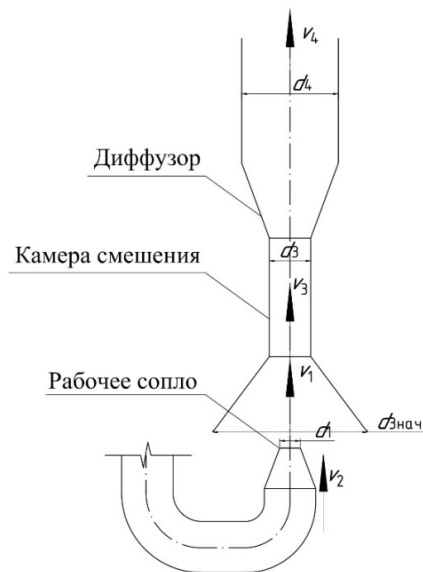


Рис. 1. Схема течения жидкости в струйном насосе

Fig. 1. Liquid flow diagram in a jet pump

На основе анализа литературных источников предложены три основных варианта конструкций реагентных струйных циркуляционных установок для регенерации фильтров водозаборных скважин.

В установке по варианту I (рис. 2) струйный и реагентный насосы работают последовательно.

Обработка фильтра и прифильтровой зоны водозаборной скважины осуществляется следующим образом. Водоподъемную колонну с закрепленной на ней снаружи гофрированной пластиковой трубой опускают внутрь очищаемого фильтра и вывешивают на оголовке скважины. Дырчатый кольцевой патрубок опускают на заливочном трубопроводе в скважину и устанавливают в верхней части очищаемого фильтра. Струйный насос, подключенный к реагентному насосу, опускают в водоподъемную колонну и устанавливают на глубине 0,5–1,0 м под статическим уровнем воды в скважине. При закрытом вентиле 4 открывают вентиль 5 и из емкости реагент по заливочному трубопроводу подают в дырчатый кольцевой патрубок, который обеспечивает равномерное распределение реагента на входе в верхнюю часть фильтра скважины. За счет большего, чем у воды, удельного веса, реагент движется вниз вдоль очищаемого фильтра 10 по гравийной обсыпке и вытесняет воду в пласт. Опорожнив емкость для реагента примерно на 3/4 ее объема, закрывают вентиль и через расчетный промежуток времени, соответствующий моменту достижения реагентом

нижней части фильтра, открывают вентиль и включают в работу реагентный насос, который подает реагент по подводящему нагнетательному трубопроводу под давлением в насадок струйного насоса.

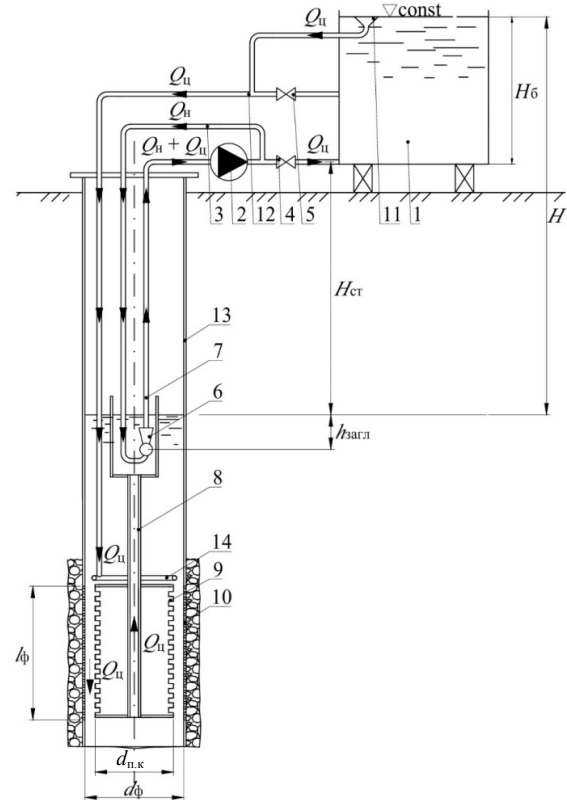


Рис. 2. Вариант I – струйный и реагентный насосы работают последовательно: 1 – емкость с реагентом; 2 – реагентный насос; 3 – подводящий нагнетательный трубопровод; 4, 5 – вентили; 6 – струйный насос; 7 – отводящий трубопровод; 8 – водоподъемная колонна; 9 – гофрированная пластиковая труба; 10 – очищаемый фильтр; 11 – слив в виде воронки; 12 – заливочный трубопровод; 13 – фильтровая колонна; 14 – дырчатый кольцевой патрубок

Fig. 2. Variant I – jet and reagent pumps operate sequentially:

1 – reagent tank; 2 – reagent pump; 3 – supply injection pipeline; 4, 5 – valves; 6 – jet pump; 7 – discharge pipeline; 8 – water riser pipe; 9 – corrugated plastic pipe; 10 – screen; 11 – funnel drain; 12 – filling pipeline; 13 – casing; 14 – perforated ring pipe

Струйный насос, создавая разрежение в водоподъемной колонне, обеспечивает восходящее движение реагента из нижней части фильтра на вход в смеситель струйного насоса, а после в отводящий трубопровод. Реагентный насос перекачивает весь расход, подаваемый струйным насосом. Циркуляционный расход Q_c возвращается в резервуар, а затем по заливочному трубопроводу снова направляется в начало фильтра. Уровень в емкости для реагента

поддерживается на постоянной отметке автоматически с помощью воронки. При этом для понижения давления до величины, необходимой в емкости, приходится дросселировать циркуляционный расход $Q_{\text{ц}}$ при помощи вентилей 4, что сопряжено с излишней тратой энергии и снижением экономичности установки.

Схему установки, показанную на рис. 2, можно использовать для подъема реагента со средних глубин (до 15 м). При больших глубинах водоподъема возникает необходимость в использовании центробежных реагентных насосов с более высокими рабочими напорами.

Гофрированная пластиковая труба позволяет создать сопротивление циркуляции реагента в стволе скважины и вынуждает двигаться реагент через закольматированную прифилтровую зону. При заливке реагента из емкости в кольцевой зазор между гофрированной трубой и фильтром обеспечиваются поступление реагента в прифилтровую зону в верхней части фильтра и возврат в скважину в его нижней части при минимальном разбавлении реагента. Циркуляция производится с помощью струйного насоса.

Момент окончания процесса декольматации фильтра определяется по стабилизации электропроводности раствора. При необходимости отработавший раствор заменяется свежим и процесс регенерации повторяется.

На рис. 3 представлено возможное распределение напоров в установке по варианту I [13, с. 186].

В случае, когда реагентный насос работает с отрицательным подпором, величина вакуума $H_{\text{вак}}$ не должна превышать допустимую вакуумметрическую высоту всасывания реагентного насоса $H_{\text{вак}}^{\text{доп}}$. Для обеспечения большей устойчивости работы установки следует принимать $H_{\text{вак}} = 0$, т. е. рассчитывать установку на подачу жидкости струйным насосом до оси реагентного насоса.

К недостаткам струйной циркуляционной установки по варианту I следует отнести то, что вся откачиваемая из скважины жидкость (реагент и продукты растворения кольматанта) должна проходить через реагентный насос. При подсосе из очищаемого фильтра песка реагентный насос может выйти из строя, так как он не рассчитан на перекачку жидкости с твердыми включениями. Струйная циркуляционная установка, выполненная по варианту II (рис. 4), лишена этого недостатка.

Вся откачиваемая из скважины жидкость, прежде чем попасть в реагентный насос, поступает по отводящему трубопроводу в отстойник, где из нее выпадают взвешенные частицы, и только после этого попадает в емкость для реагента, откуда откачивается реагентным насосом и направляется в струйный насос. Емкость для реагента имеет холостой слив, который поддерживает уровень в ней и отстойнике на постоянной отметке. За счет соединения холостого слива с заливочным трубопроводом обеспечивается непрерывная циркуляция реагента с расходом $Q_{\text{ц}}$ в фильтре.

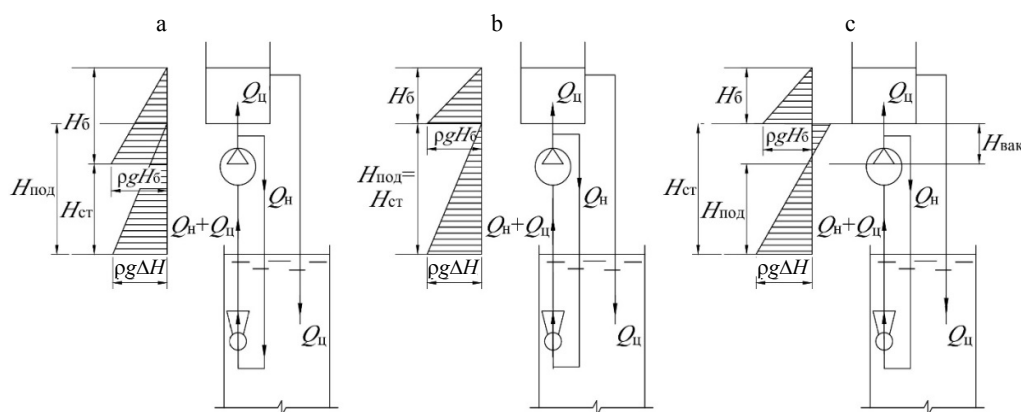


Рис. 3. Распределение напоров в установке, выполненной по варианту I:

а – струйный насос поднимает реагент выше оси реагентного насоса; б – струйный насос поднимает реагент до оси реагентного насоса; в – реагентный насос работает с отрицательным подпором [13]

Fig. 3. Distribution of pressure in the plant, made according to the Variant I:

а – jet pump lifts the reagent above the reagent pump axis; б – jet pump lifts the reagent to the axis of the reagent pump; в – reagent pump operates with negative pressure

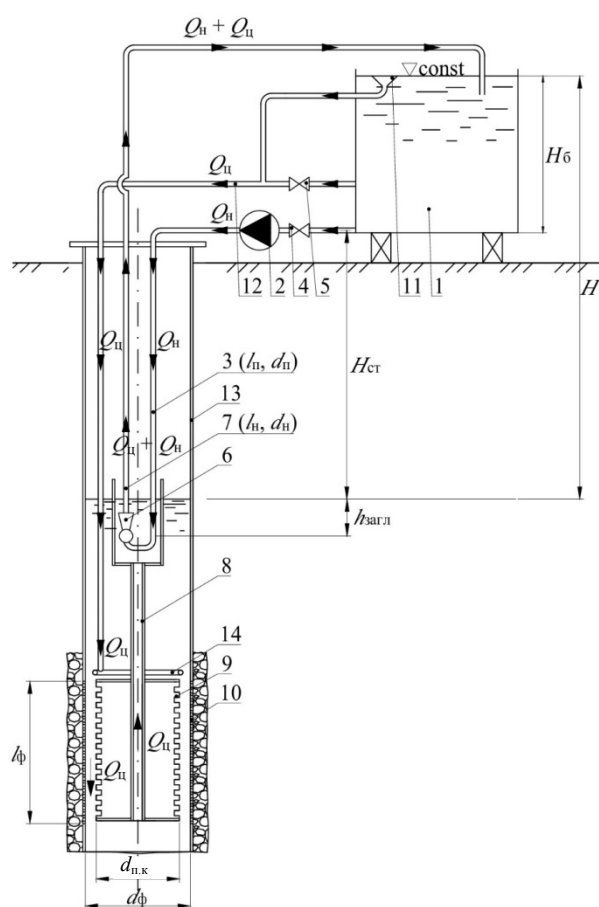


Рис. 4. Вариант II – струйный и реагентный насосы работают на резервуар: 1 – емкость с реагентом; 2 – реагентный насос; 3 – подводящий нагнетательный трубопровод; 4, 5 – вентили; 6 – струйный насос; 7 – отводящий трубопровод; 8 – водоподъемная колонна; 9 – гофрированная пластиковая труба; 10 – очищаемый фильтр; 11 – слив в виде воронки; 12 – заливочный трубопровод; 13 – фильтровая колонна; 14 – дырчатый кольцевой патрубок

Fig. 4. Variant II – both jet and reagent pumps operate on the tank: 1 – reagent tank; 2 – reagent pump; 3 – supply injection pipeline; 4, 5 – valves; 6 – jet pump; 7 – discharge pipeline; 8 – water riser pipe; 9 – corrugated plastic pipe; 10 – screen; 11 – funnel drain; 12 – filling pipeline; 13 – casing; 14 – perforated ring pipe

Инжектируемый реагент поступает в струйный насос снизу из водоподъемной колонны и является циркуляционным расходом $Q_{ц}$, принимающим непосредственное участие в регенерации фильтра.

Так как уровень реагента в емкости поддерживается постоянным, происходит его непрерывный сброс по заливочному трубопроводу и кольцевому дырчатому патрубку с расходом $Q_{ц}$ в верхнюю часть фильтра. Этот расход остается постоянным по длине концентрического коль-

цевого канала и равен расходу, инжектируемому струйным насосом из водоподъемной колонны. Отсюда следует, что циркуляционный расход $Q_{ц}$ остается постоянным в системе емкость с реагентом – концентрический кольцевой канал – водоподъемная колонна – струйный насос – емкость с реагентом.

Струйная циркуляционная установка, выполненная по варианту III, представлена на рис. 5.

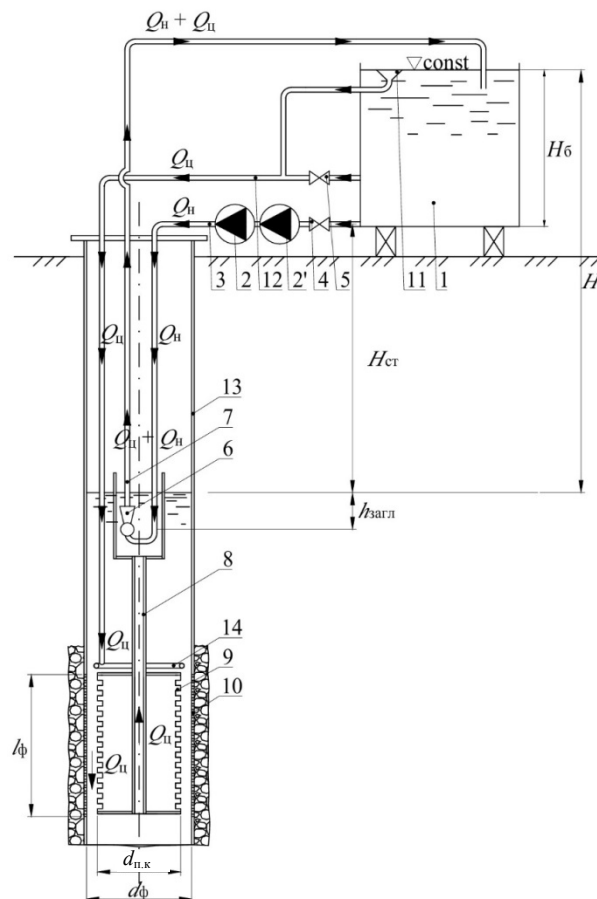


Рис. 5. Вариант III – дополнительный реагентный насос включен последовательно с основным:

1 – емкость с реагентом; 2 – реагентный насос; 2' – дополнительный реагентный насос; 3 – подводящий нагнетательный трубопровод; 4, 5 – вентили; 6 – струйный насос; 7 – отводящий трубопровод; 8 – водоподъемная колонна; 9 – гофрированная пластиковая труба; 10 – очищаемый фильтр; 11 – слив в виде воронки; 12 – заливочный трубопровод; 13 – фильтровая колонна; 14 – дырчатый кольцевой патрубок

Fig. 5. Variant III – additional reagent pump is connected in series with the main one:

1 – reagent tank; 2 – reagent pump; 2' – additional reagent pump; 3 – supply injection pipeline; 4, 5 – valves; 6 – jet pump; 7 – discharge pipeline; 8 – water riser pipe; 9 – corrugated plastic pipe; 10 – screen; 11 – funnel drain; 12 – filling pipeline; 13 – casing; 14 – perforated ring pipe

Установка дополнительного реагентного насоса, подключенного последовательно к основному, позволяет увеличить напор в насадке струйного насоса и расширить область применения оборудования скважинами с более низкими статическими уровнями, однако оборудование здесь усложняется по сравнению с вариантом II (рис. 4).

Для подбора технологического оборудования разработана методика гидравлического расчета установки.

Определение подачи реагентного насоса Q_n

Подачу реагентного насоса Q_n и его напор при подаче жидкости в смеситель струйного насоса будем определять графоаналитическим способом. Расчетная схема представлена на рис. 6.

В процессе работы реагентного насоса реагент засасывается из емкости высотой H_6 . Геометрическая высота подъема реагентного насоса относительно уровня жидкости в емкости будет отрицательной

$$H_{\Gamma} = -(H_{\text{ст}} + H_6), \quad (1)$$

где $H_{\text{ст}}$ – глубина статического уровня от уровня земли, м.

Характеристика насосной установки реагентного насоса представляет собой зависимость потребного напора $H_{\text{п.треб}}$ от расхода жидкости при движении воды во всасывающем и нагнетательном трубопроводах реагентного

насоса. По уровню жидкости в резервуаре проведем первое сечение 1–1 и плоскость сравнения 0–0 (рис. 6). Второе сечение 2–2 возьмем на статическом уровне воды в скважине. Соединив уравнением Бернулли сечения 1–1 и 2–2, получим зависимость потребного напора $H_{\text{п.треб}}$ от расхода жидкости:

$$H_{\text{п.треб}} = -H_{\Gamma} - h_{\text{п.д}} + \sum h_w, \quad (2)$$

где $h_{\text{п.д}}$ – понижение давления относительно гидростатического во всасывающей патрубке камеры смешения струйного насоса при его работе, м; $\sum h_w$ – суммарные потери напора во всасывающем и нагнетательном трубопроводах реагентного насоса, м.

Потери напора в насадке $h_{\text{нас}}$ определяем из формулы расхода Q через насадок

$$Q = \varepsilon_{\text{нас}} \varphi_{\text{нас}} \omega_{\text{нас}} \sqrt{2gh_{\text{нас}}} = \varepsilon_{\text{нас}} \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{\text{нас}}}} \omega_{\text{нас}} \sqrt{2gh_{\text{нас}}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{нас}}$, $\varphi_{\text{нас}}$, $\zeta_{\text{нас}}$ – коэффициенты сжатия, скорости и сопротивления насадка соответственно; $\varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{\text{нас}}}}$; $\omega_{\text{нас}}$ – площадь сечения насадка на выходе.

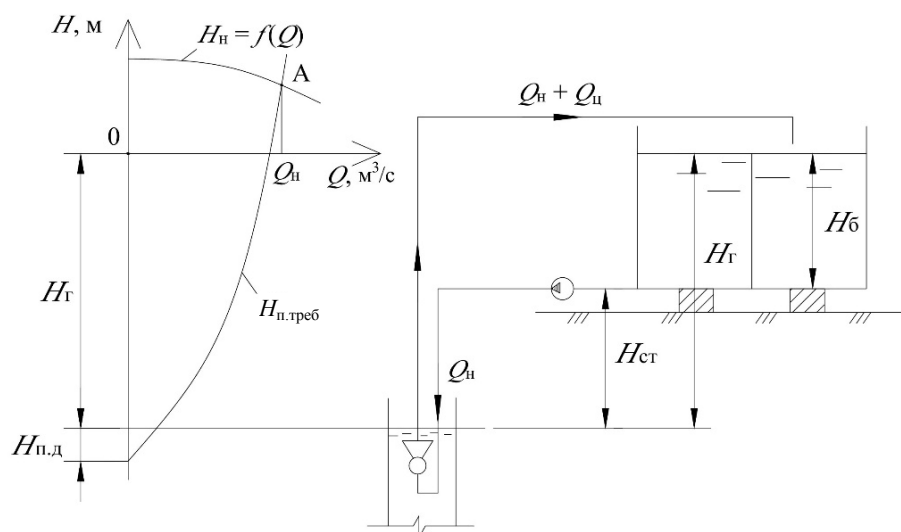


Рис. 6. Расчетная схема и общий вид графиков для определения подачи реагентного насоса:

1 – характеристика подводящего нагнетательного трубопровода, $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$; 2 – то же реагентного насоса $H_n = f(Q)$

Fig. 6. Calculation diagram and general view of graphs for determining the supply of the reagent pump:

1 – characteristics of the supply injection pipeline, $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$; 2 – characteristics of the reagent pump $H_n = f(Q)$

Суммарные потери напора $\sum h_w$ находим по формуле

$$\sum h_{w_n} = h_{вх} + h_{пов} + h_{нас} + h_{н.дл} = \left[\frac{1}{2g} \left(\frac{\zeta_{вх}}{\omega_{вс}^2} + \frac{\zeta_{пов}}{\omega_n^2} + \frac{1+\zeta_{нас}}{\varepsilon_{нас}^2 \omega_{нас}^2} \right) + A_n l_n \right] Q^2, \quad (4)$$

где $h_{вх}$ – местная потеря напора на входе во всасывающую трубу реагентного насоса; $h_{пов}$, $\zeta_{пов}$ – местная потеря напора и коэффициент сопротивления при U-образном повороте подводящего нагнетательного трубопровода на 180°; $\omega_{вс}$ – площадь сечения всасывающего трубопровода; $h_{н.дл}$ – потеря напора по длине подводящего нагнетательного трубопровода; d_n , ω_n , l_n , A_n – диаметр, площадь живого сечения, длина и удельное сопротивление подводящего нагнетательного трубопровода соответственно.

Так как в струйный насос могут поступать сравнительно крупные частицы колюматанта и песка из фильтра скважины, принимаем увеличенную площадь в начале смесительной камеры для инжектируемого потока, что позволяет уменьшить скорость v_2 . В результате получаем коническую смесительную камеру с диаметром $d_{знач} > d_3$. После этого назначаем допустимую скорость v_2 инжектируемого потока в начале смесительной камеры. Тогда понижение давления в камере смешения, необходимое для создания скоростного напора подсосываемого потока и преодоления сопротивления на его входе, определяем по формуле

$$h_{п.д} = \frac{v_2^2}{2g} (1 + \zeta_2), \quad (5)$$

где v_2 – скорость подсосываемого потока в начале смесительной камеры, $v_2 = 6,0\text{--}6,5$ м/с; ζ_2 – коэффициент местного сопротивления при входе подсосываемого потока в смесительную камеру, $\zeta_2 = 0,1$ [9].

Подачу Q_n реагентного насоса определяем графически. Пренебрегая потерями напора во всасывающем патрубке реагентного насоса из-за их малости, по принятым значениям диаметров насадка на выходе d_1 , диаметру $d_{вс}$ и длине $l_{вс}$ всасывающего трубопровода, диа-

метру d_n и длине l_n подводящего нагнетательного трубопровода по формуле (2) строим его характеристику.

Выполняем подбор реагентного насоса по каталогу. Паспортную характеристику $H_n = f(Q)$ реагентного насоса выбранной марки наносим на то же поле координат. В месте пересечения характеристик насоса и трубопровода находим рабочую точку A (рис. 6), координаты которой дают подачу Q_n и напор H_n реагентного насоса.

Расчет циркуляционного расхода и геометрических размеров струйного насоса. Рассчитаем скорость v_1 на выходе из насадка

$$v_1 = \frac{Q_n}{\omega_{нас}}. \quad (6)$$

В случае минимальных потерь энергии при смешивании потоков постоянство количества движения до и после смешивания потоков выражается равенством [9]

$$G_1 v_1 \cos \alpha_1 + G_2 v_2 \cos \alpha_2 = G_3 v'_3, \quad (7)$$

где G_1 , G_2 , G_3 – вес подаваемой, инжектируемой жидкостей и вес жидкости в смесительной камере соответственно; v_1 – скорость на выходе из насадка; v_1 , v_2 , v'_3 – осредненные скорости (по количеству движения) на выходе из насадка, в начале смесительной камеры для инжектируемого потока, в начале смесительной камеры соответственно; α_1 , α_2 – углы между векторами скорости подаваемого, инжектируемого потоков и направлением основного потока.

Весовой коэффициент инжекции β – отношение веса инжектируемой жидкости к весу жидкости, подаваемой из насадка, при $\cos \alpha_1 = 0$ равен [9]

$$\beta = \frac{G_2}{G_1} = \frac{v_1 - v'_3}{v'_3 - v_2 \cos \alpha_2}. \quad (8)$$

Значение осредненной скорости (по количеству движения) в начале смесительной камеры v'_3 находят из выражения для полного напора [9]

$$H_{ст} + H_6 + h_{4.дл} = \frac{1}{(1 + \sum \zeta_3)} \frac{(v'_3)^2}{2g} - h_{п.д}, \quad (9)$$

где $h_{4.дл}$ – потери напора по длине в отводящем трубопроводе, $h_{4.дл} = A_4 l_4 Q_4^2$ (A_4 , l_4 , Q_4 – удель-

ное сопротивление, длина и расход в отводящем трубопроводе); $\sum \zeta_3$ – сумма коэффициентов сопротивления, учитывающих потери энергии в смесительной камере и диффузоре, $\sum \zeta_3 = 0,35$ [9].

Тогда получаем

$$v'_3 = \sqrt{2g(H_{\text{ст}} + H_6 + h_{4,\text{дл}} + h_{\text{п.д}})(1 + \sum \zeta_3)}. \quad (10)$$

Циркуляционный расход $Q_{\text{ц}}$

$$Q_{\text{ц}} = \beta Q_{\text{н}}, \quad (11)$$

Суммарный расход в отводящем трубопроводе

$$Q_4 = Q_{\text{н}} + Q_{\text{ц}}. \quad (12)$$

Площадь сечения ω_2 инжектируемого потока в начале смесительной камеры из расчета его скорости v_2

$$\omega_2 = \frac{Q_{\text{ц}}}{v_2}. \quad (13)$$

Площадь сечения в начале смесительной камеры $\omega_{3\text{нач}}$ с учетом площади насадка на выходе

$$\omega_{3\text{нач}} = \omega_1 + \omega_2. \quad (14)$$

Диаметр сечения в начале смесительной камеры с учетом площади насадка на выходе

$$d_{3\text{нач}} = \sqrt{\frac{4\omega_{3\text{нач}}}{\pi}}. \quad (15)$$

Скорость в смесительной камере

$$v_3 = \frac{v'_3}{(1 + \sum \zeta_3)}. \quad (16)$$

Площадь сечения смесителя ω_3

$$\omega_3 = \frac{Q_4}{v_3}. \quad (17)$$

Диаметр сечения смесителя

$$d_3 = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\pi}}. \quad (18)$$

Соотношения геометрических размеров гидроэлеватора [9]: длина смесительной ка-

меры $l_k = 8d_3$; расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры $l' = 1,5d_1$, длина диффузора $l_d = 7(d_4 - d_3)$.

Определение скорости промывного потока реагента. Скорость $v_{\text{п.п}}$ промывного потока реагента в концентрическом кольцевом канале на внутренней поверхности фильтра определяем по формуле

$$v_{\text{п.п}} = \frac{Q_{\text{ц}}}{\omega_{\text{к.к}}} = \frac{4Q_{\text{ц}}}{\pi(d_{\text{ф}}^2 - d_{\text{г.к}}^2)}, \quad (19)$$

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

При циркуляции реагента возникает перепад уровней жидкости ΔZ снаружи и внутри колонны водоподъемной труб. Снаружи колонны уровень жидкости может быть больше, чем внутри на величину потерь напора в скважине $\Delta Z = \sum h_{w_{\text{ц}}}$ при движении жидкости от верха фильтра скважины до входа в струйный насос. Если сделать допущение о том, что уровень внутри колонны равен статическому уровню в скважине ($H_{\text{ст}} = \text{const}$), то получим

$$\Delta z = \sum h_{w_{\text{ц}}} = h_{w_{\text{к.к}}} + h_{\text{к.п}} + h_{\text{в.к}}, \quad (20)$$

где $h_{w_{\text{к.к}}}$ – потери напора по длине в концентрическом кольцевом канале; $h_{\text{к.п}}$ – то же напора на кольцевом повороте на 90° ; $h_{\text{в.к}}$ – потери напора по длине в водоподъемной колонне.

Величину h_{w_1} приближенно можно найти по формуле [19]

$$h_{w_{\text{к.к}}} = \zeta_0 \left(\frac{(1-\theta)^{0,62}}{1 + \frac{1-\theta^2}{\ln \theta^2}} \right) (1 + 0,04\theta) \frac{l_{\text{к.к}}}{d_{\text{г}}} \frac{v_{\text{к.к}}^2}{2g}, \quad (21)$$

где ζ_0 – коэффициент гидравлического сопротивления трения при турбулентном течении в круглой трубе; $\theta = d_{\text{г.к}}/d_{\text{ф}}$; $l_{\text{к.к}}$ – длина кольцевого канала; $d_{\text{г}} = d_{\text{ф}} - d_{\text{г.к}}$.

Коэффициент ζ_0 определяют по формуле

$$\zeta_0 = \frac{1}{(1,821 \cdot \lg Re - 1,64)^2},$$

где Re – число Рейнольдса, которое равно $Re = \frac{v_{к.к} d_\Gamma}{\nu}$; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Методика подбора технологического оборудования. Подберем необходимое технологическое оборудование для циркуляционной реагентной регенерации водозаборной скважины заданных размеров с помощью принудительной циркуляции реагента струйным насосом.

Пример. Исходные данные: глубина скважины $H_{ск} = 40$ м; наружные диаметры обсадной колонны и фильтра равны по 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 $H_6 = 1,2$ м.

1. В связи с наличием частиц кольматанта и песка проектируем уширенное сечение в начале смесительной камеры и назначаем в нем скорость инжектируемого потока $v_2 = 6$ м/с. По формуле (5) находим понижение давления в начале смесительной камеры:

$$h_{п.д} = \frac{6^2}{2 \cdot 9,81} (1 + 0,1) = 2 \text{ (м)}.$$

2. Задаем диаметр насадка на выходе $d_1 = 9,5$ мм. Принимаем в качестве подводящего нагнетательного трубопровода пластиковую полипропиленовую трубу (ГОСТ Р15234–2003) с наружным диаметром 40 мм и расчетным внутренним диаметром $d_n = 0,0326$ м ($A = 65300 \text{ с}^2/\text{м}^6$) [20, табл. 1.16], расчетную длину назначаем $l_n = 19$ м (с учетом глубины заглубления сопла). Коэффициент местного сопротивления на входе во всасывающую трубу реагентного насоса принимаем $\zeta_{вх} = 0,5$ [21]. Насадок принимаем конически сходящимся при угле конусности $\beta = 12\text{--}15^\circ$: $\zeta_{нас} = 0,09$, $\epsilon_{нас} = 0,98$ [21, табл. 5.7]. Для U-образного участка трубопровода с поворотом на 180° принимаем $\zeta_{пов} = 2,4$ [22, табл. 3.33].

3. Используя формулы (2)–(4), находим выражение для потребного напора $H_{п.треб}$

$$H_{п.треб} = \left[\frac{1}{2 \cdot 9,81} \left(\frac{0,5}{(0,785 \cdot 0,0514^2)^2} + \frac{2,4}{(0,785 \cdot 0,0326^2)^2} + \frac{1 + 0,09}{0,98^2 (0,785 \cdot 0,0095^2)^2} \right) + 65300 \cdot 20 \right] Q^2 - 19,2 - 2 = 12837236 Q^2 - 21,2 \text{ (м)}.$$

4. Принимаем в качестве реагентного насоса химический моноблочный насос из нержавеющей стали фирмы PURITY (Китай) PZ 32-200–55 (N) с электродвигателем мощностью 5,5 кВт, всасывающим и нагнетательным патрубками диаметрами 50 и 32 мм соответственно. Строим в системе координат H – Q характеристику подводящего нагнетательного трубопровода (кривая 1) и паспортную характеристику насоса (кривая 2), находим рабочую точку A : $H_A = 67$ м; $Q_A = 2,62$ л/с (рис. 7).

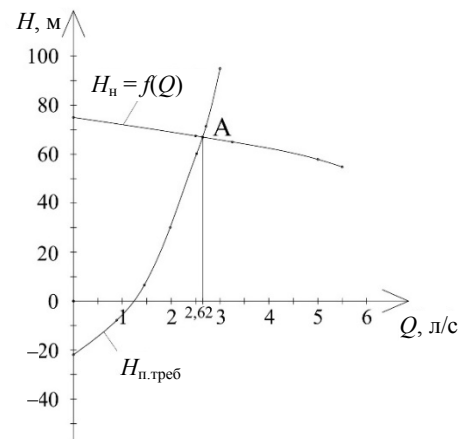


Рис. 7. Характеристики совместной работы реагентного насоса и подводящего нагнетательного трубопровода: 1 – $H_{п.треб} = f(Q)$; 2 – $H_n = f(Q)$ насоса PZ 32-200–55 (N)

Fig. 7. Characteristics of the combined operation of the reagent pump and the supply injection pipeline: 1 – $H_{п.треб} = f(Q)$; 2 – $H_n = f(Q)$ of the pump PZ 32-200–55 (N)

5. В качестве отводящего трубопровода принимаем трубу полиэтиленовую (ГОСТ 18599–2001) с наружным диаметром 63 мм и расчетным внутренним диаметром $d_4 = 0,0554$ м ($A_4 = 7934 \text{ с}^2/\text{м}^6$) [20, табл. 1.14] и длиной $l_4 = 20$ м. Значение осредненной скорости (по количеству движения) в начале смесительной камеры v'_3 находим из выражения (10). Для приближенного вычисления потерь напора по длине $h_{4дл}$ в отводящем трубопроводе принимаем весовой

коэффициент инжекции равным $\beta \approx 0,6$, тогда $Q_4 \approx 1,6Q_n \approx 4,2$ л/с. Отсюда

$$v'_3 = \sqrt{2 \cdot 9,81(18 + 1,2 + 2 + 7934 \cdot 20 \cdot 0,0042^2)(1 + 0,35)} = 25,2 \text{ (м/с)}.$$

6. Определяем скорость v_1 на выходе из насадка по (6)

$$v_1 = \frac{Q_n}{\omega_{\text{нас}}} = \frac{0,00262}{0,785 \cdot 0,0095^2} = 37 \text{ (м/с)}.$$

7. Вычисляем по формуле (7) значение β

$$\beta = \frac{37,0 - 25,2}{25,2 - 6 \cdot 0,9} = 0,60.$$

Полученное значение β соответствует предварительно принятому.

8. Циркуляционный расход $Q_{\text{ц}}$ вычисляем по (11)

$$Q_{\text{ц}} = 0,6 \cdot 2,62 = 1,57 \text{ (л/с)}.$$

Тогда, согласно (12), суммарный расход в отводящем трубопроводе

$$Q_4 = 2,62 + 1,57 = 4,19 \text{ (л/с)}.$$

9. Площадь сечения ω_2 инжектируемого потока в начале смесительной камеры вычисляем по выражению

$$\omega_2 = \frac{0,00157}{6} = 0,000262 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Площадь сечения в начале смесительной камеры $\omega_{\text{нач}}$ с учетом площади насадка на выходе

$$\omega_{\text{нач}} = 0,785 \cdot 0,0095^2 + 0,000262 = 0,0003358 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Тогда диаметр сечения в начале смесительной камеры с учетом диаметра насадка на выходе

$$d_{\text{нач}} = \sqrt{\frac{0,0003358}{0,785}} = 0,0207 \text{ (м)}.$$

10. Согласно (16) скорость в смесительной камере

$$v_3 = \frac{25,2}{(1 + 0,35)} = 18,67 \text{ (м/с)}.$$

Тогда площадь сечения смесителя ω_3 , согласно (17):

$$\omega_3 = \frac{0,00419}{18,67} = 0,000224 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Отсюда диаметр сечения смесителя

$$d_3 = \sqrt{\frac{0,000224}{0,785}} = 0,015 \text{ (м)} = 15 \text{ (мм)}.$$

Соотношения геометрических размеров струйного насоса: длина смесительной камеры $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 15 = 120$ мм; длина диффузора $l_d = 7(d_4 - d_3) = 7 \cdot (55,4 - 15) = 280$ мм.

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики установки

Characteristics of the plant

v_2 , м/с	β	v_3 , м/с	v_1 , м/с	Q_n , л/с	$Q_{\text{ц}}$, л/с	Q_4 , л/с	d_3 , мм	d_1 , мм	$H_{\text{ст}}$, м
6,0	0,6	8,67	7,0	2,62	1,57	4,19	15	9,5	18,0

Анализ результатов расчета показал, что при химическом моноблочном насосе из нержавеющей стали фирмы PURITY (Китай) PZ 32-200-55 (N) с электродвигателем мощностью 5,5 кВт, оборудованным струйным насосом с расчетными размерами, развивается напор, достаточный для подъема реагента непосредственно в циркуляционный бак при глубине статического уровня до 18 м (рис. 2).

Назначаем размеры гофрированной пластиковой колонны. Принимаем трубу гофрированную двухстенную SN8 190/160 полиэтиленовую с классом кольцевой жесткости 8, внутренним диаметром 160 мм и наружным диаметром $d_{\text{г.к.}} = 190$ мм.

Определяем скорость $v_{\text{к.к}}$ промывного потока реагента в концентрическом кольцевом канале на внутренней поверхности фильтра по (10)

$$v_{\text{к.к}} = \frac{4Q_{\text{ц}}}{\pi(d_{\text{ф}}^2 - d_{\text{г.к.}}^2)} = \frac{0,00157}{0,785(0,203^2 - 0,19^2)} = 0,39 \text{ (м/с)}.$$

Получена сравнительно высокая скорость промывного потока реагента на внутренней поверхности фильтра скважины, которая способна индуцировать фильтрационный поток реа-

гента в гравийной обсыпке и обеспечить смыл и растворение кольматирующих отложений.

ВЫВОДЫ

1. Предложены три варианта схем установок для циркуляционно-реагентной обработки фильтров водозаборных скважин с применением струйного насоса для создания принудительной циркуляции реагента по всей длине фильтра и его периметру, что обеспечивает возможность применения любых жидких и порошкообразных реагентов. Сочетание реагентного насоса со струйным аппаратом позволяет реагентному насосу поднимать реагент с глубины статического уровня воды в скважине более 10 м, что превышает допустимую высоту всасывания любого реагентного насоса. Установка гофрированной пластиковой трубы, помещенной с кольцевым зазором внутрь очищаемого фильтра, вынуждает реагент двигаться через закольматированную прифильтровую зону, что повышает эффективность и равномерность обработки, а также уменьшает объемы миграции реагента в водоносный пласт по сравнению с известными циркуляционно-реагентными способами.

2. Разработана расчетная схема движения жидкости в системе: емкость с реагентом – фильтр – водоподъемная колонна – струйный насос – емкость с реагентом. Описана методика гидравлического расчета параметров промывного потока и подбора технологического оборудования установки регенерации скважин, которая предусматривает решение системы уравнений движения графоаналитическим методом. Это позволяет получить значения циркуляционного расхода и промывной скорости в зависимости от величины статического уровня воды в скважине, геометрических размеров фильтра скважины и трубопроводов.

3. Приведен пример расчета для скважины глубиной 40 м с использованием реагентного насоса PURITY (Китай) PZ 32-200–55 (N).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 334 с.
2. Ивашечкин, В. В. Ремонтпригодные водозаборные скважины / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко; под ред. В. В. Ивашечкина. Минск: БНТУ, 2016. 228 с.
3. Тесля, В. Г. Циркуляционная регенерация скважин и пласта: дис. ... канд. техн. наук: 04.00.06 / В. Г. Тес-

- ля; ВНИИ водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. М., 1986. 144 с.
4. 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.
5. 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: No 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).
6. Патент SU 1182129 A, 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.
7. 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.
8. 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.
9. Каменев, П. Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П. Н. Каменев. М.: Стройиздат, 1970. 414 с.
10. Соколов, Е. А. Струйные аппараты / Е. А. Соколов, Н. М. Зингер. 2-е изд. М.: Энергия, 1970. 288 с.
11. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
12. Сизов, Г. Н. Гидравлические расчеты специальных систем речных танкеров / Г. Н. Сизов. Л.: Судостроение, 1976. 288 с.
13. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. Л.: Машиностроение, 1988. 268 с.
14. Myrzakhmetov, B. Method for Computational Modeling of Jet Pump Operation Modes for Transport of Productive Uranium Solutions // Transport Problems 2020: Conf. Materials XII Intern. Scientific Conference IX Intern. Symposium of Young Researchers / Silesian Univ. of Technology; ed. of chief A. Ślaskowski. Gliwice, 2020. P. 528–538.
15. Калачев, В. В. Струйные насосы: теория, расчет и проектирование / В. В. Калачев. М.: Филинь: Омега-Л, 2017. 418 с.
16. Паневник, Д. А. Повышение энергоэффективности использования скважинных струйных насосов / Д. А. Паневник, А. В. Паневник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 462–471. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-462-471>.
17. Carpenter, C. Carpenter Surface Jet Pumps Enhance Production and Processing / C. Carpenter // Journal of Petroleum Technology. 2014. Vol. 66, No 11. P. 134–136. <https://doi.org/10.2118/1114-0134-jpt>.

18. Ивашечкин, В. В. Расчет гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок / В. В. Ивашечкин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 79–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-79-90>.
19. 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; [разраб.: И. Р. Уголева, В. П. Бобков, И. П. Смогалева]. М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2012. 112 с. (Руководства по безопасности в области использования атомной энергии.)
20. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. 11-е изд., доп. М.: Бастет, 2016. 428 с.
21. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альштуль, Н. В. Данильченко [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. Изд. 4-е, 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.
9. Kamenev P. N. (1970) *Hydro-Elevators in Construction*. Moscow, Stroyizdat Publ. 414 (in Russian).
10. Sokolov E. A., Zinger N. M. (1970) *Jet Devices*. 2nd Ed. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
11. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. (1982) *Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drives*. 2nd Ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 423 (in Russian).
12. Sizov G. N. (1976) *Hydraulic Calculations of Special Systems of River Tankers*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 288 (in Russian).
13. Lyamaev B. F. (1988) *Hydrojet Pumps and Installations*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 268 (in Russian).
14. Myrzakhmetov B. (2020) Method for Computational Modeling of Jet Pump Operation Modes for Transport of Productive Uranium Solutions. *Transport Problems 2020: Conf. Materials XII Intern. Scientific Conference IX Intern. Symposium of Young Researchers*. Gliwice, 528–538.
15. Kalachev V. V. (2017) *Jet Pumps: Theory, Calculation and Design*. Moscow, Filin: Omega-L Publ. 418 (in Russian).
16. Panevny D. A., Panevny A. V. (2020) Improving the Energy Efficiency of the Use of Borehole Jet Pumps. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (5), 462–471. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-462-471> (in Russian).
17. Carpenter C. (2014) Surface Jet Pumps Enhance Production and Processing. *Journal of Petroleum Technology*, 66 (11), 134–136. <https://doi.org/10.2118/1114-0134-jpt>.
18. Ivashechkin V. V. (2016) Hydraulic Elevator Installation Estimation for the Water Source Well Sand-Pack Cleaning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (1), 79–90 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-79-90>.
19. 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).
20. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) *Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes*. 11th Ed. Moscow, Bastet Publ. 428 (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).

Поступила 19.03.2025

Подписана в печать 21.05.2025

Опубликована онлайн 28.11.2025

REFERENCES

Received: 19.03.2025

Accepted: 21.05.2025

Published online: 28.11.2025