

УДК 628.112

## Расчет гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок

В. В. Ивашечкин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2015  
Belarusian National Technical University, 2015

**Реферат.** Предложена конструкция гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок. Рассмотрена гидравлическая схема установки, согласно которой вода из напорного бака подается рабочим насосом в скважину по двум параллельным трубопроводам: гидромониторному с размывающим насадком для разрушения песчаной пробки и подводящему трубопроводу, который подключен к рабочему соплу гидроэлеватора, содержащего всасывающий и подающий трубопроводы для забора гидросмеси и ее удаления из скважины. Составлены уравнения движения жидкости по подводящему и гидромониторному трубопроводам, получены выражения для определения в них потребных напоров. Для нахождения расходов воды в подводящем и гидромониторном трубопроводах предложено использовать графический метод, позволяющий путем построения характеристик насоса и трубопроводов в координатах  $Q-H$  найти режимную точку. Для определения полезной высоты подъема, подачи и размеров гидроэлеватора использовали уравнение количества движения с допущением о постоянстве количества движения до и после смешивания потоков в гидроэлеваторе. С целью оценки производительности гидроэлеватора предложены зависимости для расчета продолжительности удаления песчаной пробки в зависимости от ее размеров и расхода инжектируемой жидкости. Приведен пример расчета параметров гидроэлеваторной установки для удаления песчаной пробки в водозаборной скважине глубиной 41 м и диаметром 150 мм, пробуренной в д. Узла Мядельского района Минской области. Работоспособность изготовленного и испытанного в лаборатории опытного образца гидроэлеваторной установки была подтверждена при натурных испытаниях на указанной скважине.

Предложенная методика расчета параметров гидроэлеваторной установки позволяет при заданных глубине и диаметре скважины графическим методом подобрать рабочий насос, диаметры подводящего и гидромониторного трубопроводов, а затем рассчитать размеры струйного насоса-гидроэлеватора и подающего трубопровода, произвести анализ эффективности и производительности работы установки.

**Ключевые слова:** скважина, песчаная пробка, гидроэлеватор, рабочий насос

**Для цитирования:** 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

## Hydraulic Elevator Installation Estimation for the Water Source Well Sand-Pack Cleaning Up

V. V. Ivashchkin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article offers design of a hydraulic elevator installation for cleaning up water-source wells of sand packs. It considers the installation hydraulic circuit according to which the normal

---

### Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 268-84-50  
gts@bntu.bu

### Address for correspondence

Ivashchkin Vladimir V.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 268-84-50  
gts@bntu.bu

---

pump feeds the high-level tank water into the borehole through two parallel water lines. The water-jet line with washing nozzle for destroying the sand-pack and the supply pipe-line coupled with the operational nozzle of the hydraulic elevator containing the inlet and the supply pipelines for respectively intaking the hydromixture and removing it from the well. The paper adduces equations for fluid motion in the supply and the water-jet pipelines and offers expressions for evaluating the required heads in them. For determining water flow in the supply and the water-jet pipe lines the author proposes to employ graphical approach allowing finding the regime point in  $Q-H$  chart by means of building characteristics of the pump and the pipe-lines. For calculating the useful vertical head, supply and dimensions of the hydraulic elevator the article employs the equation of motion quantity with consistency admission of the motion quantity before and after mixing the flows in the hydraulic elevator. The suggested correlations for evaluating the hydraulic elevator efficiency determine the sand pack removal duration as function of its sizes and the ejected fluid flow rate. A hydraulic-elevator installation parameters estimation example illustrates removing a sand pack from a water-source borehole of 41 m deep and 150 mm diameter bored in the village of Uzla of Myadelsk region, of Minsk oblast. The working efficiency of a manufactured and laboratory tested engineering prototype of the hydraulic elevator installation was acknowledged in actual tests at the indicated borehole site. With application of graphical approach, the suggested for the hydraulic elevator installation parameters calculation procedure allows selecting, with given depth and the borehole diameter, the normal pump, diameters of the supply and the water-jet pipe lines. After that, calculating dimensions of the jet pump – hydraulic elevator and the supply pipe line, and performing analysis of efficiency and work out characteristics of the installation.

**Keywords:** borehole, sand pack, hydraulic elevator, normal pump

**For citation:** Ivashchkin V. V. (2016) Hydraulic Elevator Installation Estimation for the Water Source Well Sand-Pack Cleaning Up. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (1), 79–90 (in Russian)

Снижение дебита скважин, вскрывающих водоносные гравийно-песчаные отложения, и выход этих скважин из строя, как правило, вызваны кольматацией и пескованием. Песок осаждается в отстойнике, образуя так называемую песчаную пробку, частично или полностью перекрывающую фильтр. Для ее извлечения чаще всего применяют желонирование и эрлифтную прокачку [1]. Желонирование скважины требует значительных трудозатрат, кроме того, при сбрасывании желонки на песчаную пробку в фильтре возникают растягивающие напряжения, которые при ослаблении коррозией водоприемной поверхности могут привести к ее разрушению. Применение эрлифтов сопряжено с использованием мощных передвижных компрессоров с дизельными двигателями и кранового оборудования для монтажа-демонтажа эрлифта, что не всегда экономично при прокачках неглубоких скважин малых диаметров.

В этой связи представляется перспективным использовать для удаления песчаных пробок насосы-гидроэлеваторы, способные перекачивать пульпу и загрязненные жидкости [2, 3]. Теоретические основы работы струйных насосов разработаны П. Н. Каменевым [4], Е. А. Соколовым [5], Л. Г. Подвидом [6], Г. Н. Сизовым [7], Б. Ф. Лямаевым [8]. Для эффективного удаления песчаных пробок гидроэлеваторная установка, помимо рабочего насоса со струйным насосом-гидроэлеватором, должна дополнительно содержать гидромониторный трубопровод с насадком, обеспечивающим размыв пробки. Отсутствие в литературе методик расчета параметров подобных гидроэлеваторных установок для скважинных условий, характеризующихся широким диапазоном глубин (10–250 м) и диаметров скважин (100–400 мм), сдерживает их применение на практике.

Поэтому целью исследований являлась разработка методики расчета параметров гидроэлеваторной установки для очистки водозаборных скважин от песчаных пробок. Расчетная схема гидроэлеваторной установки представлена на рис. 1.

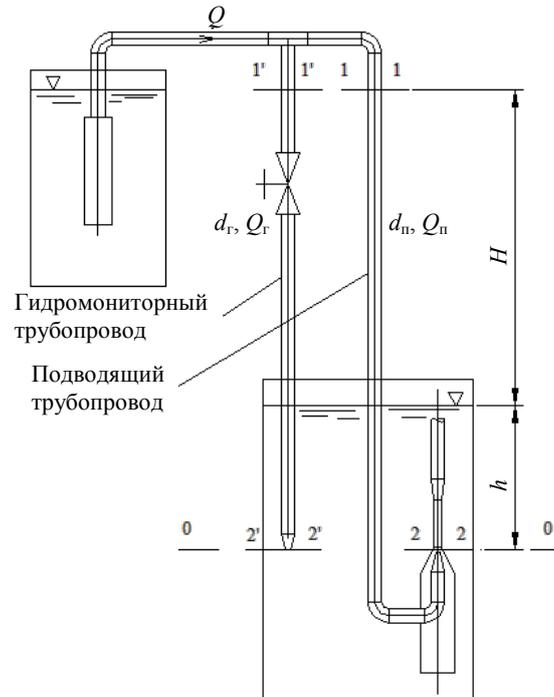


Рис. 1. Расчетная схема гидроэлеваторной установки

Fig. 1. Hydraulic elevator design diagram

Вода подается погружным насосом из напорного резервуара в гидромониторный трубопровод с пробковым краном и размывающим коническим насадком и в подводящий трубопровод с активным соплом гидроэлеватора. Составим уравнения движения жидкости по подводящему и гидромониторному трубопроводам.

Соединим уравнением Д. Бернулли сечения 1–1 и 2–2, плоскость сравнения 0–0 возьмем на выходе из активного сопла в скважине:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_{ж}g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_{ж}g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h_{wn}, \quad (1)$$

где  $z_i$ ,  $p_i$ ,  $v_i$  – геометрическая высота, пьезометрическое давление и скорость движения жидкости в  $i$ -м сечении соответственно;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;  $\sum h_{wn}$  – потери напора в подводящем трубопроводе.

Согласно рис. 1:

$$z_1 = H + h; z_2 = 0; p_1 = p_{п.треб}; v_2 = v_c = \frac{Q_{п.}}{\omega_c}; v_1 = v_{п.} = \frac{Q_{п.}}{\omega_{п.}}, \quad (2)$$

где  $p_{п.треб}$  – требуемое давление в подводящем трубопроводе;  $v_c$  – скорость в выходном сечении сопла площадью  $\omega_c$ ;  $v_{п.}$ ,  $Q_{п.}$ ,  $\omega_{п.}$  – скорость, расход, площадь сечения в подводящем трубопроводе.

Пьезометрическое давление в сечении 2–2

$$p_2 = \rho_{ж} g (h - h_{п.д}), \quad (3)$$

где  $h_{п.д}$  – понижение давления во всасывающем патрубке гидроэлеватора, имеющем сороудерживающую сетку на входе, при его работе.

После ввода обозначения  $\frac{p_{п.треб}}{\rho_{ж} g} = H_{п.треб}$  и подстановки (2) и (3) в (1) по-

лучим выражение для характеристики подводящего трубопровода

$$H_{п.треб} = \frac{\alpha v_c^2}{2g} - \frac{\alpha v_{п.}^2}{2g} - H - h_{п.д} + \sum h_{w_{п.}} \quad (4)$$

Потери напора  $\sum h_{w_{п.}}$  в подводящем трубопроводе составят

$$\begin{aligned} \sum h_{w_{п.}} &= h_{w_{п.м}} + h_{w_{п.дл}} = (2h_{пов} + h_{п.суж} + h_{соп}) + h_{w_{п.дл}} = \\ &= \frac{v_{п.}^2}{2g} \left( 2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_{п.}^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_{п.}^2}{\omega_{п.}^2} \right) + i_t l_{п.} = \sum \zeta_{пм} \frac{v_{п.}^2}{2g} + i_t l_{п.}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $h_{w_{п.м}}$ ,  $h_{w_{п.дл}}$  – потери напора на местных сопротивлениях и по длине;  $h_{пов}$ ,  $h_{п.суж}$ ,  $h_{соп}$  и  $\zeta_{пов}$ ,  $\zeta_{п.суж}$ ,  $\zeta_{соп}$  – местные потери напора и коэффициенты сопротивлений при повороте трубопровода на  $90^\circ$ , постепенном сужении трубопровода на подходе к соплу, выходе потока из сопла соответственно;  $v_{сж}$  – скорость движения потока во входном сечении сопла;  $i_t$  – удельные потери напора при температуре воды  $t$ , °С, м/м;  $l_{п.}$  – длина подводящего трубопровода, м.

Соединим уравнением Д. Бернулли вида (1) сечения 1'–1' и 2'–2'. Относительно плоскости сравнения 0–0 (рис. 1) имеем:

$$z_{1'} = H + h; z_{2'} = 0; p_{1'} = p_{г.треб}; v_{2'} = v_{нас} = \frac{Q_{г.}}{\omega_{нас}}; v_{1'} = v_{г.} = \frac{Q_{г.}}{\omega_{г.}}, \quad (6)$$

где  $p_{г.треб}$  – требуемое давление в начальном сечении гидромониторного трубопровода;  $v_{нас}$  – размывающая скорость в выходном сечении конического насадка площадью  $\omega_{нас}$ ;  $v_{г.}$ ,  $Q_{г.}$ ,  $\omega_{г.}$  – скорость, расход, площадь сечения в гидромониторном трубопроводе.

Пьезометрическое давление в сечении 2'–2' принимаем  $p_{2'} = \rho_{ж} g h$ . Подставив параметры в уравнение Д. Бернулли и введя обозначение

$\rho_{г.треб}/\rho_{ж}g = H_{г.треб}$ , получим необходимый напор в сечении 1'–1' и выражение для характеристики подводящего трубопровода

$$H_{г.треб} = \frac{\alpha v_{нас}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{г}^2}{2g} - H + \sum h_{вт}. \quad (7)$$

Потери напора  $\sum h_{вт}$  в гидромониторном трубопроводе

$$\begin{aligned} \sum h_{вт} &= h_{вт.м} + h_{вт.дл} = (h_3 + h_{нас}) + h_{вт.дл} = \\ &= \frac{v_{г}^2}{2g} \left( \zeta_3 + \zeta_{нас} \frac{\omega_{г}^2}{\omega_{нас}^2} \right) + i_{г} l_{г} = \sum \zeta_{г.м} \frac{v_{г}^2}{2g} + i_{г} l_{г}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $h_{вт.м}$ ,  $h_{вт.дл}$  – потери напора в местных сопротивлениях и по длине;  $h_3$ ,  $h_{нас}$ ,  $\zeta_3$ ,  $\zeta_{нас}$  – потери напора и коэффициенты сопротивления в пробковом кране и при выходе из насадка;  $l_{г}$  – длина гидромониторного трубопровода;  $\zeta_{г.м}$  – коэффициент местного сопротивления.

Рассмотрим схему струйного насоса-гидроэлеватора (рис. 2) [4].

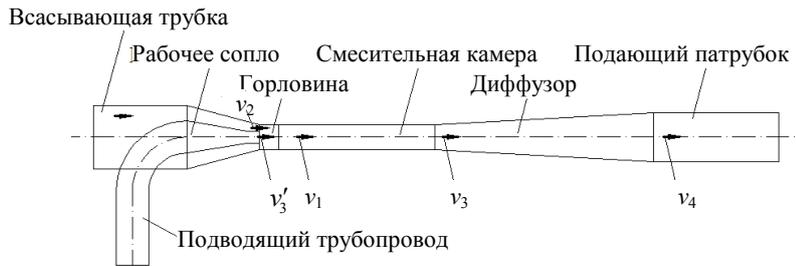


Рис. 2. Схема струйного насоса-гидроэлеватора

Fig. 2. Jet pump-hydraulic elevator diagram

В случае минимальных потерь энергии при смешивании потоков постоянство количества движения до и после смешивания потоков выражается уравнением [4]

$$G_1 v_1 \cos \alpha_1 + G_2 v_2 \cos \alpha_2 = G_3 v_3, \quad (9)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  – вес подаваемой, инжектируемой жидкостей и жидкости в смешивательной камере соответственно;  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  – осредненные скорости (по количеству движения): на срезе сопла, инжектируемого потока и потока в смешивательной камере;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – углы между векторами скорости подаваемого, инжектируемого потоков и направлением основного потока.

Весовой коэффициент инжекции – отношение веса инжектируемой жидкости к весу жидкости, подаваемой из сопла, равен:

$$\beta = \frac{G_2}{G_1} = \frac{\rho_{г.с} V_2}{\rho_{ж} V_1} = \frac{\rho_{г.с}}{\rho_{ж}} \beta', \quad (10)$$

где  $\rho_{г.с}$  – плотность инжектируемой жидкости;  $V_1$ ,  $V_2$  – объем подаваемой и инжектируемой жидкостей;  $\beta'$  – объемный коэффициент инжекции.

Разделив выражение (9) на  $G_1$  и выразив  $v_3$ , получим:

$$v_3 = \frac{v_1 + \beta v_2}{1 + \beta}. \quad (11)$$

Понижение давления в камере смешения:  $h_{п.д} = \frac{v_2^2}{2g}(1 + \zeta_2)$ , где  $\zeta_2$  – коэффициент местного сопротивления при входе подсасываемого потока в смесительную камеру. Откуда скорость инжектируемого потока равна

$$v_2 = \sqrt{\frac{h_{п.д} 2g}{1 + \zeta_2}}. \quad (12)$$

Суммарный расход гидроэлеватора

$$Q_3 = Q_1 + \beta' Q_1, \quad (13)$$

где  $Q_1$  – расход рабочей жидкости.

$$\text{Диаметр смесительной камеры } d_3 = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi v_3}}.$$

Скорость в подающем трубопроводе  $v_4 = \frac{Q_3}{\omega_4}$ , где  $\omega_4$  – площадь поперечного сечения подающего трубопровода.

Полезная высота подъема воды [4]

$$H_{\text{под}} = p - \sum h_{w4} = (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{п.д} - \sum h_{w4}, \quad (14)$$

где  $p$  – давление, создаваемое гидроэлеватором;  $\sum h_{w4}$  – потери напора в подающем трубопроводе;  $\zeta_3$  – коэффициент, учитывающий потери энергии в смесительной камере и диффузоре,  $\zeta_3 = 0,3$  [4].

Соотношения геометрических размеров гидроэлеватора [4]: длина смесительной камеры  $l_k = 8d_3$ ; расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры  $l' = 1,5d_1$ , где  $d_1 = d_c$  ( $d_c$  – диаметр сопла); длина диффузора  $l_d = 7(d_4 - d_3)$ , где  $d_4$  – диаметр подающего трубопровода.

### Пример расчета параметров гидроэлеваторной установки

Рассчитаем гидроэлеваторную установку для удаления песчаной пробки из водозаборной скважины глубиной 41 м в д. Узла Мядельского района Минской области (рис. 3). Глубина динамического уровня в скважине при работе гидроэлеватора  $Z_d = -34,0$  м. Внутренний диаметр фильтра  $d_\phi = 0,15$  м. Рабочий насос погружной, смонтирован в емкости, установленной на насыпи павильона. Принимаем: подводящий трубопровод – труба ПЭ 80 SDR 11-32×2,4 ( $d_n = 0,027$  м) длиной  $l_n = 43$  м с активным соплом

$d_c = 7$  мм; гидромониторный трубопровод – труба ПЭ 80 SDR 11-20×2,0 ( $d_r = 0,016$  м) длиной  $l_r = 42$  м с размывающим насадком  $d_{нас} = 7$  мм; подающий трубопровод – труба ПЭ 80 SDR 17-50×3 ( $d_4 = 0,044$  м).

*Построение характеристики подводящего трубопровода.* Коэффициент сопротивления плавного сужения равен [9]

$$\zeta_{п.суж} = k \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = 0,25 \left( \frac{1}{0,615} - 1 \right)^2 = 0,098,$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи при постепенном сужении подводящего трубопровода при подходе к соплу,  $\varepsilon \approx 0,615$  при  $d_{п} = 0,027$  м,  $d_{суж} = 0,010$  м;  $k$  – коэффициент смягчения при постепенном сужении,  $k = 0,25$  при угле конусности  $20^\circ$ .

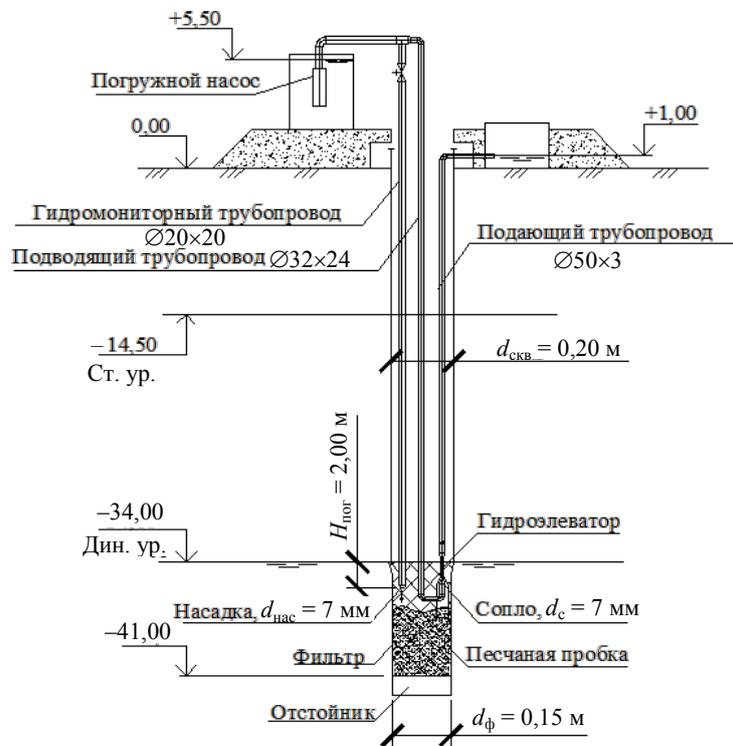


Рис. 3. Схема размещения элементов установки на скважине

Fig. 3. The installation units on the borehole layout

Для сопла, выполненного в виде конически сходящегося насадка при углах конусности  $12^\circ$ – $15^\circ$ , принимали  $\zeta_{соп} = 0,1$ . Возьмем  $\zeta_{пов} = 0,28$  для плавного поворота на  $90^\circ$  для отношения радиуса закругления к диаметру  $R/d = 2$  шероховатого трубопровода [9]. Тогда суммарный коэффициент сопротивления

$$\sum \zeta_{г.м} = \left( 2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_{п}^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_{п}^2}{\omega_{с}^2} \right) =$$

$$= 2 \cdot 0,28 + 0,098 \frac{0,027^4}{0,010^4} + 0,09 \frac{0,027^4}{0,007^4} = 24,8.$$

Для определения  $i_t$  при  $t = 10^\circ\text{C}$  использовали таблицы Шевелева [10]. Требуемый напор вычисляли по формуле (4) и, пренебрегая значением  $h_{п.д.}$ , строили характеристику подводящего трубопровода (рис. 4, кривая 2).

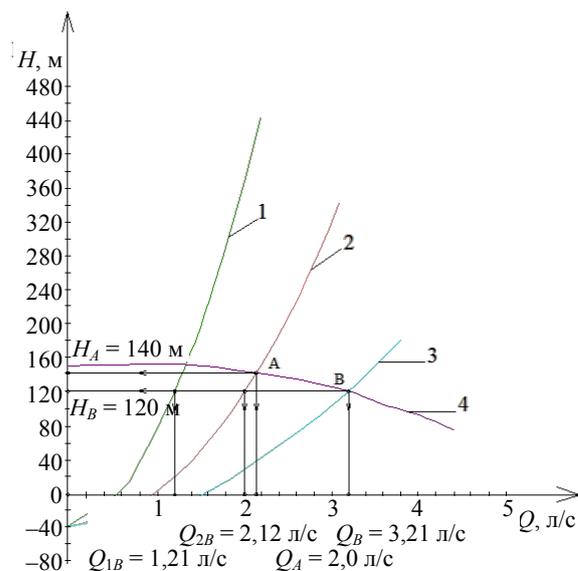


Рис. 4. Характеристики совместной работы погружного насоса и трубопроводов: 1 – характеристика гидромониторного трубопровода; 2 – то же подающего трубопровода; 3 – суммарная характеристика трубопроводов; 4 – характеристика насоса

Fig. 4. Parameters of the submerged pump and manifold joint operation: 1 – characteristic of the water-jet pipe line; 2 – same for the supply pipeline; 3 – combined characteristic of the pipe lines; 4 – the pump characteristics

*Построение характеристики гидромониторного трубопровода.*

Принимаем:  $\zeta_k = 0,05$  – для полностью открытого пробкового крана [9],  $\zeta_{нас} = 0,09$  – для конически сходящегося насадка при углах конусности  $\beta = 12^\circ\text{--}15^\circ$ , тогда

$$\sum \zeta_{г.м} = \left( \zeta_3 + \zeta_{нас} \frac{\omega_{г.}^2}{\omega_{нас}^2} \right) = 0,05 + 0,09 \frac{(0,2 \cdot 10^{-3})^2}{(0,038 \cdot 10^{-3})^2} = 2,5.$$

Требуемый напор вычисляем по формуле (7) и строим характеристику гидромониторного трубопровода (рис. 4, кривая 2), получаем суммарную характеристику двух трубопроводов (кривая 3).

Подбираем погружной насос ЭЦВ 6-10-120 с характеристикой (кривая 4) и находим рабочие точки:  $A$  – при работе насоса на один подводящий трубопровод ( $H_A = 140$  м;  $Q_A = 2,12$  л/с);  $B$  – то же на два трубопровода ( $H_B = 120$  м;  $Q_B = 3,21$  л/с;  $Q_{1B} = 1,21$  л/с;  $Q_{2B} = 2,00$  л/с).

### Расчет геометрических размеров гидроэлеватора

Рассмотрим самый неблагоприятный расчетный случай (рис. 5): насос подает воду в подводящий и гидромониторный трубопроводы при полностью открытой задвижке в последнем (рабочая точка  $B$ ).

Согласно рис. 4, расход в подводящем трубопроводе  $Q_1 = Q_{2B} = 2$  л/с. Определяем по (2) скорость инжектируемого потока  $v_2$ , принимая ориентировочно  $h_{п.д} \approx 2,0$  м и  $\xi_2 = 0,1$  [3]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{h_{п.д} \cdot 2g}{1 + \xi_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 9,81}{1 + 0,1}} = 6 \text{ (м/с)}.$$

Определяем весовой коэффициент инжекции  $\beta$  по формуле (10), приняв объемный коэффициент инжекции  $\beta' = 0,6$ :  $\beta = \frac{\rho_{г.с}}{\rho_{ж}} \beta' = \frac{1040}{1000} \cdot 0,6 = 0,62$ .

Средняя скорость смешивающихся потоков в начале смесительной камеры на основании выражения (11) составит

$$v_3 = \frac{v_1 + \beta v_2}{1 + \beta} = \frac{52 + 0,62 \cdot 6}{1 + 0,62} = 34,4 \text{ (м/с)},$$

где

$$v_1 = v_c = \frac{Q_1}{\omega_c} = \frac{0,002}{0,785 \cdot 0,007^2} = 52 \text{ (м/с)}.$$

Подача гидроэлеватора  $Q_3 = Q_1 + \beta' Q_1 = 2 + 0,6 \cdot 2 = 3,2$  (л/с).

Диаметр смесительной камеры:  $d_3 = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi v_3}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0032}{3,14 \cdot 34,4}} \approx 0,012$  (м).

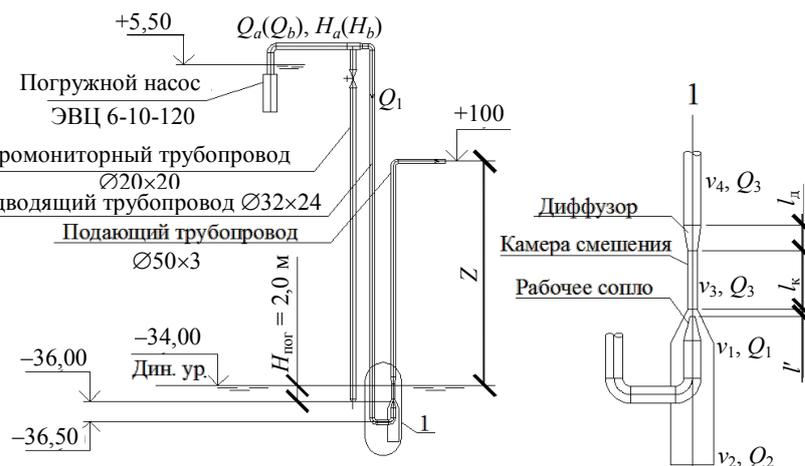


Рис. 5. Расчетная схема гидроэлеваторной установки

Fig. 5. Hydraulic elevator design diagram

Скорость гидросмеси в подающем трубопроводе ( $d_4 = 0,044$  м)

$$v_4 = \frac{Q_3}{\omega_4} = \frac{Q_3}{0,785d_4^2} = \frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,044^2} = 2,1 \text{ (м/с)}.$$

Потери напора в подающем трубопроводе

$$\sum h_{W4} = h_{W4M} + h_{W4дл} = \zeta_{пов} \frac{v_4^2}{2g} + i_l l = 0,55 \frac{2,1^2}{2 \cdot 9,81} + 0,12 \cdot 35 = 4,3 \text{ (м)},$$

где  $h_{W4M}$ ,  $h_{W4дл}$  – потери напора на местных сопротивлениях и по длине подающего трубопровода;  $\zeta_{пов} = 0,55$  [9];  $i_l = 0,12$  при  $v_4 = 2,1$  м/с [10].

Полезная высота подъема воды, согласно (14):

$$H_{под} = p - \sum h_{W4} = (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{пл} - \sum h_{W4} = (1 - 0,3) \frac{34,4^2}{2 \cdot 9,81} - 2 - 4,3 = 35,9 \text{ (м)}.$$

Так как  $H_{под} = 35,9$  м  $>$   $\Delta Z = 35$  м, то гидроэлеватор, работая в самом неблагоприятном режиме, способен поднять песок на поверхность.

Расчетные размеры гидроэлеватора: длина смесительной камеры  $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 0,012 \approx 0,1$  (м); расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры  $l' = 1,5d_1 = 1,5d_c = 1,5 \cdot 0,007 = 0,011$  (м); длина диффузора  $l_d = 7 \cdot (d_4 - d_3) = 7 \cdot (0,044 - 0,012) = 0,23$  (м).

Теоретический КПД гидроэлеватора – отношение полезной работы, создаваемой гидроэлеватором, к работе, затрачиваемой рабочим насосом [4]:

$$\eta = \frac{Q_2 p}{Q_1 p_1} = \frac{Q_2 \left[ (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{пл} \right]}{Q_1 \left( \frac{v_1^2}{2g} - h_{пл} \right)} = \frac{1,2 \cdot \left[ (1 - 0,3) \frac{34,4^2}{2 \cdot 9,81} - 2 \right]}{2 \cdot \left( \frac{52^2}{2 \cdot 9,81} - 2 \right)} = 0,18,$$

где  $p_1$  – давление в плоскости выходного сечения насадки.

Для оценки производительности гидроэлеватора определим продолжительность удаления песчаной пробки толщиной  $h_{п} = 5$  м в фильтре диаметром  $d_{ф} = 150$  мм.

Объем извлекаемого песка  $V_{пес} = 0,785d_{ф}^2 h_{пес} = 0,785 \cdot 0,15^2 \cdot 5 = 0,09$  (м<sup>3</sup>).

Масса песка в песчаной пробке  $M_{пес} = \rho_{пес} V_{пес} = 1600 \cdot 0,09 = 144$  (кг).

Доля песка в инжектируемой пульпе  $A = \frac{\rho_{г.с} - \rho_{ж}}{\rho_{тв} - \rho_{ж}} = \frac{1,04 - 1}{2,65 - 1} = 0,024$ ,

где  $\rho_{г.с}$  – плотность гидросмеси,  $\rho_{г.с} = 1,04$  т/м<sup>3</sup>.

Масса инжектируемого песка в 1 м<sup>3</sup> пульпы  $m_{и.пес} = \rho_{тв} \cdot A = 2650 \cdot 0,0242 = 64$  (кг/м<sup>3</sup>).

Теоретическая продолжительность удаления песчаной пробки

$$t_p = \frac{M_{\text{п}}}{m_{\text{и.пес}} Q_2} = \frac{144}{64 \cdot 0,0012 \cdot 60} = 32 \text{ (мин)}.$$

В результате по полученным размерам был сконструирован и изготовлен гидроэлеватор, конструкция которого позволяет регулировать расстояние от выходного сечения активного сопла до входного сечения камеры смешения. Проведены его лабораторные [3] и полевые испытания [11] в составе гидроэлеваторной установки на скважине в д. Узла Мядельского района, которые подтвердили его эффективность.

### ВЫВОД

Разработана методика расчета гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из водозаборных скважин, содержащей струйный насос-гидроэлеватор и гидромониторный трубопровод с насадком, обеспечивающим размыв песчаной пробки. Приведен пример расчета параметров установки. Методика позволяет при заданных глубине и диаметре скважины графическим методом подобрать рабочий насос, диаметры подводящего и гидромониторного трубопроводов, а затем рассчитать размеры струйного насоса-гидроэлеватора и подающего трубопровода, произвести анализ эффективности работы установки. Рассчитанная по предлагаемой методике гидроэлеваторная установка прошла испытания в лабораторных и полевых условиях на скважине в д. Узла Мядельского района глубиной 41 м и диаметром 150 мм и подтвердила свою работоспособность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д. Н. Башкатов [и др.]. М.: Недра, 1988. 268 с.
2. Гидроэлеватор: авт. свидетельство СССР № 1173076. А. М.Кл.4 F04F 5/00 / В. А. Романов, Н. А. Богомолов (СССР). – Заявка № 3688731/25-06; заявлено 06.01.1984; опубл. 15.08.1985. Бюл. № 30 // Открытия. Изобретения. 1985. № 30.
3. Лабораторные испытания гидроэлеватора для извлечения песчаных пробок из скважин / В. В. Ивашечкин [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т., Минск, 2013 г. / БНТУ; редкол.: Б. М. Хрусталева [и др.]. Минск, 2013. Т. 2. С.109.
4. Каменев, П. Н. Гидроэлеваторы в строительстве / П. Н. Каменев. М.: Стройиздат, 1964. 403 с.
5. Соколов, Е. А. Струйные аппараты / Е. А. Соколов, Н. М. Зингер. 2-е изд. М.: Энергия, 1970. 288 с.
6. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта [и др.]. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
7. Сизов, Г. Н. Гидравлические расчеты специальных систем речных танкеров / Г. Н. Сизов. Л.: Судостроение, 1976. 288 с.
8. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. Л.: Машиностроение, 1988. 268 с.
9. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 238 с.

10. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. 6-е изд. М.: Стройиздат, 1984. 116 с.
11. Натурные испытания гидроэлеватора для извлечения песчаных пробок из скважин / В. В. Иващечкин [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т. / редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. Минск: БНТУ, 2014. Т. 1. С. 128.

Поступила 06.04.2015    Подписана в печать 29.05.2015    Опубликовано онлайн 29.01.2016

#### REFERENCES

1. Bashkatov D. N., Drakhlis S. L., Safonov V. V., Kvashnin G. P. (1988) *Special Operations at Drilling and Installation of the Drill-Holes on the Water*. Moscow, Nedra. 268 p. (in Russian).
2. Romanov V. A., Bogomolov N. A. (1985) Hydraulic Ejector. Certificate of Authorship of the USSR No 1173076. (in Russian).
3. Ivashchekin V. V., Avtushko P. A., Kurch A. N., Antipova A. A., Rudman N. A., Bobkova Iu. A. (2013) Hydraulic Ejector Laboratory Experimentations for Extracting Sand Plugs out of the Boreholes. *Nauka – Obrazovaniuu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Odinnadtsatoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. Tom 2* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Science and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk: BNTU, 109. (in Russian).
4. Kamenev P. N. (1964) *Hydraulic Elevators in Construction*. Moscow, Stroyizdat. 403 p. (in Russian).
5. Sokolov Ye. A., Zinger, N. M. (1970) *Jet Apparatuses*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energia. 288 p. (in Russian).
6. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B., Baibakov O. V., Kirillovskii Iu. L. (1982) *Hydraulics, Hydraulic Machines and Allhydraulic Drives*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie. 423 p. (in Russian).
7. Sizov G. N. (1976) *Hydraulic Calculations of the Riverine Tanker Ships Special Systems*. Leningrad, Sudostroenie. 288 p. (in Russian).
8. Lyamaev B. F. (1988) *Water-Jet Pumps and Installations*. Leningrad, Mashinostroenie. 268 p. (in Russian).
9. Kiselev P. G., Altshul A. D., Danilchenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. (1972) *Hydraulic Designs Reference Books*. Moscow, Energia. 238 p. (in Russian).
10. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (1984) *Tabulations for Water Supply Lines Hydraulic Calculations*. 6<sup>th</sup> ed. Moscow, Stroyizdat. 116 p. (in Russian).
11. Ivashchekin V. V., Avtushko P. A., Kondratovich A. N., Mashuk Ju. S., Kurch A. N. (2014) Hydraulic Ejector Actual Tests for Extracting Sand Plugs out of the Boreholes. *Nauka – Obrazovaniuu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Dvenadstoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. Tom 1* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Science and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk: BNTU, 128. (in Russian).

Received: 6 April 2015

Accepted: 29 May 2015

Published online: 29 January 2016