

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-281-289>

УДК 628.112

## Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин

Инж. Ю. А. Медведева<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. В. В. Ивашечкин<sup>1)</sup>, студ. Е. С. Сацута<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** В статье рассмотрена технологическая схема гидроэлеваторной 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, который подключен к рабочему соплу гидроэлеватора. Гидроэлеватор содержит всасывающий и подающий трубопроводы для забора гидросмеси и очистки одно- и двухколонных водозаборных скважин от песчаных пробок. Приведена методика расчета и подбора параметров технологического оборудования установки. На основании составленных уравнений движения жидкости по подводящему трубопроводу с активным соплом и гидромониторному трубопроводу с размывающим насадком получены выражения для построения напорных характеристик этих трубопроводов. Предложен графоаналитический метод определения расходов воды в них путем построения характеристик рабочего насоса и трубопроводов и нахождения координат рабочей точки. Варьируя параметры трубопроводов и характеристики рабочего насоса, не изменяя параметры струйного насоса-гидроэлеватора, вычисляли значения полезной высоты подъема гидроэлеватора. Это позволило подобрать два варианта технологического оборудования гидроэлеваторной установки (для полипропиленовых и стальных труб) для удаления песчаных пробок из водозаборных скважин максимальной глубиной 50 и 75 м.

**Ключевые слова:** водозаборная скважина, пескование, песчаная пробка, капитальный ремонт, гидроэлеватор, насос, водоснабжение

**Для цитирования:** Медведева, Ю. А. Расчет параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки для удаления песчаных пробок из скважин / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 281–289. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-281-289>

## Calculation of Parameters of Technological Equipment of Hydraulic Elevator Installation for Removing Sand Plugs from Wells

J. A. Medvedeva<sup>1)</sup>, V. V. Ivashechkin<sup>1)</sup>, E. S. Satsuta<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The paper considers the technological scheme of the hydraulic elevator installation, according to which water from a pressure tank is supplied by a working pump to the well through two parallel pipelines: a hydraulic monitor with a washing nozzle for destroying a sand plug and a supply pipeline that is connected to the working nozzle of a hydraulic elevator containing suction and supply pipelines for taking slurry and cleaning single- and double-column water wells from sand plugs. The methodology for calculation and selection of parameters of technological equipment of the installation is given. Based on the compiled equations of fluid motion along the supply pipeline with an active nozzle and the hydraulic monitoring pipeline with a scouring nozzle, expressions have been obtained for constructing the pressure characteristics of these pipelines. A graphic-analytical method is proposed for determining water flow rates in them by constructing the characteristics of a working pump and

### Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-30-13  
ivashechkin\_vlad@mail.ru

### Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-30-13  
ivashechkin\_vlad@mail.ru

pipelines and finding the coordinates of the operating point. By varying the parameters of the pipelines and the characteristics of the working pump, without changing the parameters of the jet pump-hydraulic elevator, the values of the useful lifting height of the hydraulic elevator were calculated, which has made it possible to select two options for the technological equipment of the hydraulic elevator installation (for polypropylene and steel pipes) for removing sand plugs from water wells with a maximum depth of 50 and 75 m.

**Keywords:** water well, sanding, sand plug, overhaul, hydraulic elevator, pump, water supply

**For citation:** Medvedeva J. A., Ivashechkin V. V., Satsuta E. S. (2022) Calculation of Parameters of Technological Equipment of Hydraulic Elevator Installation for Removing Sand Plugs from Wells. *Science and Technique*. 21 (4), 281–289. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-281-289> (in Russian)

## Введение

В процессе длительной эксплуатации удельный дебит большинства скважин вначале снижается, а затем они могут полностью выйти из строя. Уменьшение и прекращение подачи воды из скважин происходит, как правило, из-за кольматации и пескования. Песок при неправильной эксплуатации скважины либо при наличии дефектов обсадной трубы, сальника или фильтра осажается в стволе скважины и образует песчаную пробку, которая частично или полностью перекрывает фильтр. Для ее извлечения применяют желонирование и эрлифтную прокачку [1]. Желонирование скважины требует значительных трудозатрат, кроме этого, при сбрасывании желонки на песчаную пробку в фильтре возникают растягивающие напряжения, которые при ослаблении коррозией водоприемной поверхности могут привести к ее разрушению. При использовании эрлифтов применяется специальное оборудование, включающее мощные передвижные компрессоры с дизельными двигателями и автокраны для монтажа-демонтажа эрлифта, что не всегда экономично.

Для удаления песчаных пробок из фильтров пескующих скважин можно использовать насосы-гидроэлеваторы, которые способны перекачивать пульпу и загрязненные жидкости [2, 3]. Теоретические основы работы струйных насосов разработаны П. Н. Каменевым, Е. А. Соколовым, Г. Н. Сизовым, Б. Ф. Лямаевым и др. [4–12].

С целью эффективного удаления песчаных пробок гидроэлеваторная установка, кроме рабочего насоса со струйным насосом-гидроэлеватором, должна быть дополнена гидромониторным трубопроводом с насадком, который обеспечивает размыв слежавшейся песчаной пробки. С учетом этого необходимо внести коррективы в методику подбора технологического оборудования для установки. В [13] приведен расчет геометрических размеров гидро-

элеватора (рис. 1) и параметров оборудования гидроэлеваторной установки с гидромониторным трубопроводом для удаления песчаных пробок из одноколонных скважин глубиной до 40 м. Следует отметить, что такие глубины скважин в Республике Беларусь характерны для слабозащищенных с поверхности надморенных отложений сожской морены, в то время как основным водоносным горизонтом для хозяйственно-питьевого водоснабжения является днепровско-сожский горизонт, который сложен рыхлыми водовмещающими породами (песками различного гранулометрического состава) и каптируется скважинами (глубиной установки 50–75 м), оборудованными фильтрами. Помимо одноколонных скважин, представляется перспективным применение на этот водоносный горизонт двухколонных скважин как обладающих наибольшей долговечностью [14, 15]. Поэтому для расширения области использования гидроэлеваторных установок с более глубокими водозаборными скважинами, в том числе двухколонных конструкций, потребовалось уточнение методики расчета параметров гидроэлеваторной установки для работы в таких условиях.

В БНТУ для удаления песчаных пробок при текущем ремонте водозаборных скважин предложено применять гидроэлеваторную установку, имеющую несложное технологическое обо-

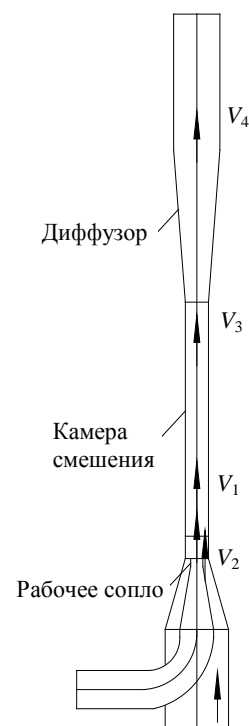


Рис. 1. Схема насоса-гидроэлеватора  
Fig. 1. Scheme of hydraulic elevator pump

рудование [16]. Схема установки для удаления песка из двухколонной двухфильтровой скважины представлена рис. 2.

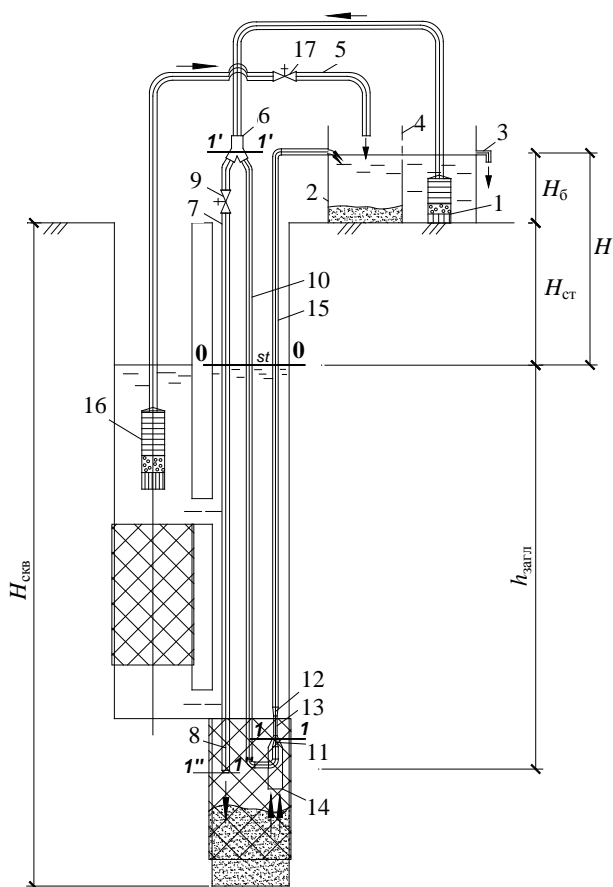


Рис. 2. Гидроэлеваторная установка для ремонта двухколонной скважины: 1 – рабочий насос; 2 – бак; 3 – холостой слив; 4 – сетчатая перегородка; 5 – напорный трубопровод; 6 – тройник; 7 – гидромониторный трубопровод; 8 – размывающий конический насадок; 9 – вентиль на гидромониторном трубопроводе; 10 – подводящий трубопровод; 11 – рабочее сопло; 12 – диффузор; 13 – камера смешения; 14 – всасывающий патрубок насоса-гидроэлеватора; 15 – пульповод; 16 – погружной насос; 17 – вентиль на напорном трубопроводе

Fig. 2. Hydraulic elevator installation for repair of two-column well: 1 – working pump; 2 – tank; 3 – idle drain; 4 – mesh partition; 5 – pressure pipeline; 6 – tee; 7 – hydraulic monitoring pipeline; 8 – eroding conical nozzle; 9 – valve on hydraulic monitoring pipeline; 10 – supply pipeline; 11 – working nozzle; 12 – diffuser; 13 – mixing chamber; 14 – suction pipe of hydraulic elevator pump; 15 – pulp duct; 16 – submersible pump; 17 – valve on pressure pipeline

Вначале у устья скважины монтируют бак с холостым сливом и сетчатой перегородкой. Бак заполняется водой по напорному трубопро-

воду с помощью погружного насоса, который смонтирован в первой колонне двухколонной скважины. В бак опускают рабочий насос. Во второй колонне монтируют насос-гидроэлеватор с подводящим трубопроводом и пульповодом, а также гидромониторный трубопровод с размывающим коническим насадком и вентилем.

В процессе работы насоса-гидроэлеватора вода с песком поступает из скважины глубиной  $H_{\text{свб}}$  в бак высотой  $H_6$ , излишки осветленной воды сбрасывают обратно в скважину через холостой слив. Чтобы уровни воды в баке и скважине поддерживать на постоянной отметке, соответствующей статическому уровню  $H_{\text{ст}}$  воды в скважине, с помощью вентиля на гидромониторном и напорном трубопроводах устанавливают нужный циркуляционный расход в системе бак – скважина – бак. Тогда геометрическая высота подъема насоса-гидроэлеватора

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

При проектировании геометрических размеров насоса-гидроэлеватора исходили из положений [4]. Весовой коэффициент инжекции – отношение веса инжектируемой жидкости к весу жидкости, подаваемой из сопла, определяется, как в [4]:

$$u = \frac{G_2}{G_1} = \frac{\rho_{\text{г.с}} g V_2}{\rho_{\text{ж}} g V_1} = \frac{\rho_{\text{г.с}}}{\rho_{\text{ж}}} u', \quad (2)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  – вес подаваемой и инжектируемой жидкостей;  $\rho_{\text{г.с}}$  – плотность инжектируемой жидкости;  $\rho_{\text{ж}}$  – то же жидкости;  $V_1$ ,  $V_2$  – объем подаваемой и инжектируемой жидкостей;  $u'$  – объемный коэффициент инжекции.

Скорость в смесительной камере (рис. 1)

$$v_3 = \frac{v_1 + uv_2}{1 + u}, \quad (3)$$

где  $v_1$ ,  $v_2$  – осредненная скорость (по количеству движения) соответственно на срезе сопла и инжектируемого потока.

Понижение давления в камере смешения определим по формуле

$$h_{\text{п.д}} = \frac{v_2^2}{2g} (1 + \zeta_2), \quad (4)$$

где  $\zeta_2$  – коэффициент местного сопротивления при входе подсосываемого потока в смесительную камеру.

Из (4) скорость инжектируемого потока

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

Суммарный расход гидроэлеватора запишем в виде

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = Q_1 + u'Q_1, \quad (6)$$

где  $Q_1$  – расход рабочей жидкости.

Диаметр смесительной камеры  $d_3 = \sqrt{\frac{4\omega_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q_3}{\pi v_3}}$ . Скорость в подающем трубопроводе

де  $v_4 = \frac{Q_3}{\omega_4}$ , где  $\omega_4$  – площадь поперечного сечения подающего трубопровода.

Полезную высоту подъема воды определяем по формуле [4]

$$H_{\text{под}} = p - \sum h_{w_4} = (1 - \zeta_3) \frac{v_3^2}{2g} - h_{п.д} - \sum h_{w_4}, \quad (7)$$

где  $p$  – напор, создаваемый гидроэлеватором;  $\sum h_{w_4}$  – потери напора в подающем трубопроводе;  $\zeta_3$  – коэффициент, учитывающий потери энергии в смесительной камере и диффузоре,  $\zeta_3 = 0,3$  [4].

По статическому уровню воды в скважине проведем плоскость сравнения 0–0 (рис. 2), а через тройник – сечение 1'–1'. Тогда давление в этом сечении будет одинаковым на входе в гидромониторный и подводящий трубопроводы. Сечение 1–1 возьмем на выходе из активного сопла (рис. 2). Соединив уравнением Бернулли сечения 1'–1' и 1–1, составим уравнение движения жидкости по подводящему трубопроводу

$$z_{1'} + \frac{p_{1'}}{\rho_j g} + \frac{\alpha v_{1'}^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho_j g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + \sum h_{w_{п}}, \quad (8)$$

где  $z_i$ ,  $p_i$ ,  $v_i$  – геометрическая высота, пьезометрическое давление и скорость движения жидкости в  $i$ -м сечении соответственно;  $\sum h_{w_{п}}$  – потери напора в подводящем трубопроводе.

Относительно плоскости сравнения 0–0 получим:

$$z_{1'} = H; \quad z_1 = -h_{\text{загл}}; \quad p_{1'} = p_{1'п.треб};$$

$$v_1 = v_c = \frac{Q_{п}}{\omega_c}; \quad v_{1'} = v_{п} = \frac{Q_{п}}{\omega_{п}}, \quad (9)$$

где  $h_{\text{загл}}$  – заглубление сопла под уровень воды в скважине;  $p_{1'п.треб}$  – требуемое давление в подводящем трубопроводе;  $v_c$  – скорость в выходном сечении сопла диаметром  $d_c$  и площадью  $\omega_c$ ;  $v_{п}$ ,  $Q_{п}$ ,  $\omega_{п}$  – скорость, расход и площадь живого сечения в подводящем трубопроводе соответственно.

Пьезометрическое давление в сечении 1–1

$$p_1 = \rho_j g (h_{\text{загл}} - h_{п.д}), \quad (10)$$

где  $h_{п.д}$  – понижение давления относительно гидростатического во всасывающей патрубке камеры смешения насоса-гидроэлеватора при его работе.

Введем обозначение  $\frac{p_{п.треб}}{\rho_j g} = H_{п.треб}$  и под-

ставим (9) и (10) в (8). Тогда выражение для характеристики подводящего трубопровода примет вид

$$H_{п.треб} = \frac{\alpha v_c^2}{2g} - \frac{\alpha v_{п}^2}{2g} - H - h_{п.д} + \sum h_{w_{п}}. \quad (11)$$

Потери напора в подводящем трубопроводе определим по формуле

$$\sum h_{w_{п}} = h_{w_{п,м}} + h_{w_{п,дл}} = (2h_{пов} + h_{п.суж} + h_{соп}) +$$

$$+ h_{w_{п,дл}} = \frac{v_{п}^2}{2g} \left( 2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_{п}^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_{п}^2}{\omega_c^2} \right) +$$

$$+ k_{п} A_{п} l_{п} Q_{п}^2 = \sum \zeta_{п} \frac{v_{п}^2}{2g} + k_{п} A_{п} l_{п} Q_{п}^2,$$

где  $h_{w_{п,м}}$ ,  $h_{w_{п,дл}}$  – потеря напора на местных сопротивлениях и по длине соответственно;  $h_{пов}$ ,  $h_{п.суж}$ ,  $h_{соп}$  и  $\zeta_{пов}$ ,  $\zeta_{п.суж}$ ,  $\zeta_{соп}$  – местные потери напора и коэффициенты сопротивлений при повороте трубопровода на 90°, при постепенном сужении трубопровода на подходе к соплу, при выходе потока из сопла соответственно;

$\omega_{сж}$  – площадь входного сечения сопла;  $A_{п}$  – удельное сопротивление подводящего трубопровода [17];  $k_{п}$  – поправочный коэффициент, на который при  $v \neq 1$  м/с следует умножать значения  $A_{п}$ ;  $l_{п}$  – длина подводящего трубопровода, м;  $\zeta_{п}$  – коэффициент сопротивления подводящего трубопровода.

Соединив уравнением Бернулли вида (8) сечения 1'-1' и 1''-1'', составим уравнение движения жидкости по гидромониторному трубопроводу. Относительно плоскости сравнения 0-0 (рис. 2) имеем

$$z_{1'} = H; z_{1''} = -h_{загл}; p_{1'} = p_{1г.треб};$$

$$v_{1''} = v_{нас} = \frac{Q_{г}}{\omega_{нас}}; v_{1'} = v_{г} = \frac{Q_{г}}{\omega_{г}}, \quad (13)$$

где  $p_{1г.треб}$  – требуемое давление в гидромониторном трубопроводе;  $v_{нас}$  – скорость в выходном сечении размывающего насадка площадью  $\omega_{нас}$ ;  $v_{г}$ ,  $Q_{г}$ ,  $\omega_{г}$  – скорость, расход и площадь сечения в гидромониторном трубопроводе.

Принимаем пьезометрическое давление в сечении 1''-1''  $p_{1''} = \rho_{ж} g h_{загл}$ . Получим требуемый напор в сечении 1'-1' и выражение для характеристики гидромониторного трубопровода, подставив параметры в уравнение Бернулли:

$$H_{г.треб} = \frac{\alpha v_{нас}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{г}^2}{2g} - H + \sum h_{w_r}. \quad (14)$$

Потери напора в гидромониторном трубопроводе определим по формуле

$$\sum h_{w_r} = h_{w_r,м} + h_{w_r,дл} = (h_{к} + h_{нас}) + h_{w_r,дл} =$$

$$= \frac{v_{г}^2}{2g} \left( \zeta_{к} + \zeta_{нас} \frac{\omega_{г}^2}{\omega_{нас}^2} \right) + k_{г} A_{г} l_{г} Q_{г}^2 = \quad (15)$$

$$= \sum \zeta_{г} \frac{v_{г}^2}{2g} + k_{г} A_{г} l_{г} Q_{г}^2,$$

где  $h_{w_r,м}$ ,  $h_{w_r,дл}$  – потери напора в местных сопротивлениях и по длине;  $h_{к}$ ,  $h_{нас}$ ,  $\zeta_{к}$ ,  $\zeta_{нас}$  – потери напора и коэффициенты сопротивления в пробковом кране и при выходе из насадка;  $l_{г}$  – длина гидромониторного трубопровода;  $A_{г}$ ,  $k_{г}$  – удельное сопротивление и поправочный коэффициент гидромониторного трубопровода;

$\zeta_{г}$  – коэффициент сопротивления гидромониторного трубопровода.

Определим расходы в гидромониторном и подводящем трубопроводах графически, так как они подключены параллельно. Пренебрегаем потерями напора в напорном патрубке рабочего насоса из-за их малости. По формулам (11), (14) строим характеристики указанных трубопроводов, задавая произвольно расходы, и, суммируя их по правилам сложения характеристик параллельных трубопроводов, строим суммарную характеристику. В месте ее пересечения с характеристикой погружного насоса  $H_{н} = f(Q)$  находим рабочую точку *A* (рис. 3).

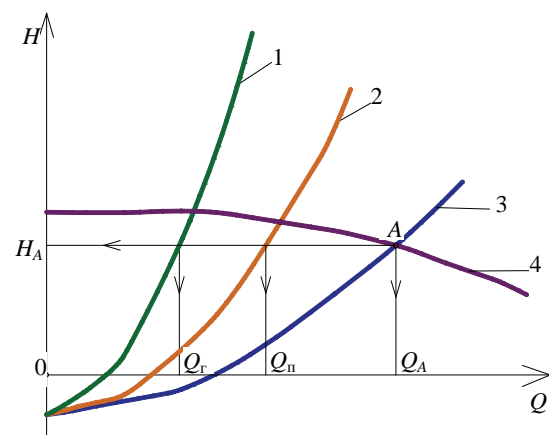


Рис. 3. Характеристики совместной работы рабочего насоса и трубопроводов: 1 – гидромониторного,  $H_{г.треб} = f(Q)$ ; 2 – подводящего,  $H_{п.треб} = f(Q)$ ; 3 – суммарная характеристика трубопроводов; 4 – характеристика насоса  $H_{н} = f(Q)$

Fig. 3. Characteristics of joint operation of working pump and pipelines: 1 – hydraulic monitoring pump,  $H_{г.треб} = f(Q)$ ; 2 – supply pipeline,  $H_{п.треб} = f(Q)$ ; 3 – total characteristics of pipelines; 4 – characteristics of pump  $H_{н} = f(Q)$

### Пример расчета параметров гидроэлеваторной установки

1. Исходные данные:  $d_c = 6,8$  мм;  $H_{ст} = 23,0$  м;  $H_6 = 2,0$  м. Рассмотрим возможность применения полипропиленовых труб, поставляемых в бухтах по 100 м, в качестве материала для трубопроводов.

Построение характеристики подводящего трубопровода. Параметры подводящего трубопровода: труба ПП-100 SDR 11 32×3,4, внутренний диаметр  $d_{п} = 0,0262$  м, длина  $l_{п} = 60$  м. Коэффициент сопротивления плавного сужения подводящего трубопровода при подходе к соплу [18]

$$\zeta_{п.суж} = k \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = 0,25 \left( \frac{1}{0,615} - 1 \right)^2 = 0,098, \quad (16)$$

где  $k$  – коэффициент смягчения при постепенном сужении,  $k = 0,25$  при угле конусности  $20^\circ$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи при постепенном сужении подводящего трубопровода при подходе к соплу,  $\varepsilon \approx 0,615$  при  $d_n = 0,026$  м и  $d_{суж} = 0,010$  м.

Для сопла, выполненного в виде конически сходящегося насадка при углах конусности  $\beta = 12^\circ - 15^\circ$ , принимали  $\zeta_{соп} = 0,09$ . Принимаем  $\zeta_{пов} = 0,28$  – для плавного поворота на  $90^\circ$  при отношении радиуса закругления к диаметру  $R/d = 2$  шероховатого трубопровода [18]. Тогда суммарный коэффициент сопротивления подводящего трубопровода

$$\sum \zeta_{п} = 2\zeta_{пов} + \zeta_{п.суж} \frac{\omega_n^2}{\omega_{сж}^2} + \zeta_{соп} \frac{\omega_n^2}{\omega_c^2} = 2 \cdot 0,28 + 0,098 \frac{0,026^4}{0,010^4} + 0,09 \frac{0,026^4}{0,0068^4} = 24,3. \quad (17)$$

Для определения потерь напора в трубопроводах использовали таблицы Ф. А. Шевелева [17]. Требуемый напор для построения характеристики трубопровода вычисляли по формуле (11).

*Построение характеристики гидромониторного трубопровода.* Параметры гидромониторного трубопровода: труба ПП-100 SDR 11 20×2,4, внутренний диаметр  $d_r = 0,0162$  м, длина  $l_r = 60$  м. Трубопровод снабжен размывающим насадком диаметром  $d_{нас} = 7$  мм на выходе и пробковым краном на входе. В этом случае  $\zeta_k = 0,05$  – для полностью открытого пробкового крана [18],  $\zeta_{нас} = 0,09$  – для конически сходящегося насадка при углах конусности  $\beta = 12^\circ - 15^\circ$ . Тогда суммарный коэффициент сопротивления гидромониторного трубопровода

$$\sum \zeta_r = \zeta_k + \zeta_{нас} \frac{\omega_r^2}{\omega_{нас}^2} =$$

$$= 0,05 + 0,09 \frac{0,0162^4}{0,007^4} = 2,51. \quad (18)$$

Требуемый напор вычисляем по (14). Строим характеристики (рис. 4) гидромониторного (кривая 1) и подводящего (кривая 2) трубопроводов. По характеристике совместной работы трубопроводов (кривая 3) подбираем погружной насос ЭЦВ 6-10-160 с напорной характеристикой (кривая 4), находим рабочую точку  $A$  – при работе насоса на два трубопровода:  $H_A = 163$  м;  $Q_A = 2,84$  л/с;  $Q_r = 0,95$  л/с;  $Q_n = 1,89$  л/с.

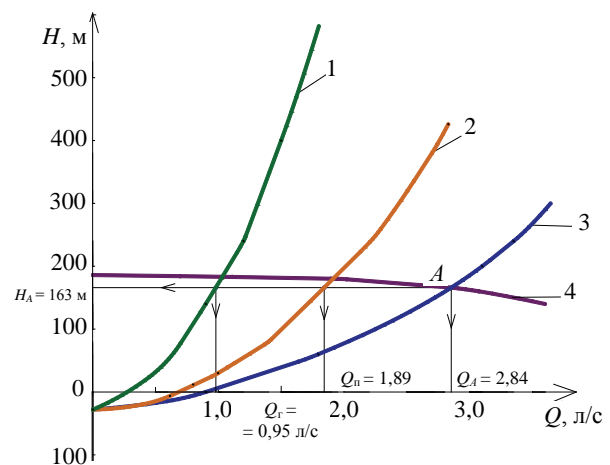


Рис. 4. Характеристики совместной работы рабочего насоса и трубопроводов (полипропиленовые трубы): 1 –  $H_{г.треб} = f(Q)$ ; 2 –  $H_{п.треб} = f(Q)$ ; 3 – характеристика совместной работы трубопроводов; 4 –  $H_n = f(Q)$  насоса ЭЦВ 6-10-160

Fig. 4. Characteristics of joint operation of working pump and pipelines (polypropylene pipes): 1 –  $H_{г.треб} = f(Q)$ ; 2 –  $H_{п.треб} = f(Q)$ ; 3 – characteristics of joint work of pipelines; 4 –  $H_n = f(Q)$  of ЭЦВ 6-10-160-pump

*Анализ эффективности работы установки и расчет геометрических размеров гидроэлеватора.* Рассмотрим самый неблагоприятный расчетный случай: пробковый кран полностью открыт. Согласно рис. 4, расход в подводящем трубопроводе  $Q_1 = Q_n = 1,89$  л/с. Ориентировочно принимаем  $h_{п.д} \approx 1,0$  м,  $\zeta_2 = 0,1$ ,  $u' = 0,27$  [16]. Параметры подающего трубопровода: труба ПП-100 SDR 11 50×4,6, диаметр  $d_4 = 0,0408$  м, длина  $l_{под} = 60$  м,  $H = 25$  м. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Так как  $H_{под} = 54,7$  м  $>$   $H_{скв} = 50,0$  м, то гидроэлеватор, работая в самом неблагоприятном режиме, способен поднять песок на поверхность.

Гидравлические характеристики гидроэлеватора при полипропиленовых трубах  
Hydraulic characteristics of hydraulic elevator with polypropylene pipes

$v_2$ , м/с	$u$	$v_3$ , м/с	$v_1$ , м/с	$Q_3$ , м <sup>3</sup> /с	$d_3$ , м	$v_4$ , м/с	$H_{\text{под}}$ , м
4,2	0,28	41,6	52,1	0,0024	0,0086	1,87	54,7

Определим геометрические размеры насоса-гидроэлеватора исходя из рекомендуемых соотношений [4]:

– длина смесительной камеры  $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 0,086 \approx 0,1$  м;

– расстояние до плоскости среза насадки от начала смесительной камеры  $l' = 1,5d_1 = 1,5d_c = 1,5 \cdot 0,0068 = 0,01$  м, где  $d_1 = d_c$ ,  $d_c$  – диаметр сопла;

– длина диффузора  $l_d = 7(d_4 - d_3) = 7 \times (0,0408 - 0,0086) = 0,23$  м,  $d_4$  – диаметр подающего трубопровода.

Анализ результатов расчета показал, что при глубине скважин до 50 м давление рабочего насоса не превышает предельное давление, на которое рассчитаны полипропиленовые трубы (1,6 МПа). Следовательно, при глубинах скважин более 50 м требуется замена этих труб на стальные.

2. Аналогично рассчитаем параметры гидроэлеваторной установки с применением стальных труб с соединительными муфтами.

*Построение характеристики подводящего трубопровода.* Исходные данные:  $d_c = 6,8$  мм;  $H_{\text{ст}} = 23,0$  м;  $H_6 = 2,0$  м;  $\zeta_{\text{п.суж}} = 0,098$ . Параметры подводящего трубопровода: длина  $l_{\text{п}} = 80$  м; внутренний диаметр  $d_{\text{п}} = 0,032$  м.

Суммарный коэффициент сопротивления подводящего трубопровода

$$\sum \zeta_{\text{п}} = 2\zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{п.суж}} \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{сж}}^2} + \zeta_{\text{соп}} \frac{\omega_{\text{п}}^2}{\omega_{\text{с}}^2} = 2 \cdot 0,28 + 0,098 \frac{0,032^4}{0,010^4} + 0,09 \frac{0,032^4}{0,0068^4} = 55. \quad (19)$$

Требуемый напор для построения  $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$  вычисляли по формуле (11).

*Построение характеристики гидромониторного трубопровода.* Параметры гидромониторного трубопровода: длина  $l_{\text{г}} = 80$  м; внутренний диаметр  $d_{\text{г}} = 0,02$  м, диаметр насадка  $d_{\text{нас}} = 7$  мм.

Суммарный коэффициент сопротивления гидромониторного трубопровода

$$\sum \zeta_{\text{г}} = \zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{нас}} \frac{\omega_{\text{г}}^2}{\omega_{\text{нас}}^2} = 0,05 + 0,09 \frac{0,02^4}{0,007^4} = 6,05. \quad (20)$$

Требуемый напор  $H_{\text{г.треб}} = f(Q)$  вычисляем по (14). Строим характеристики трубопроводов (рис. 5). По характеристике совместной работы трубопроводов (кривая 3) подбираем погружной насос ЭЦВ 6-10-235 с напорной характеристикой (кривая 4), находим рабочую точку  $A$ :  $H_A = 199$  м;  $Q_A = 3,62$  л/с;  $Q_{\text{г}} = 1,43$  л/с;  $Q_{\text{п}} = 2,19$  л/с.

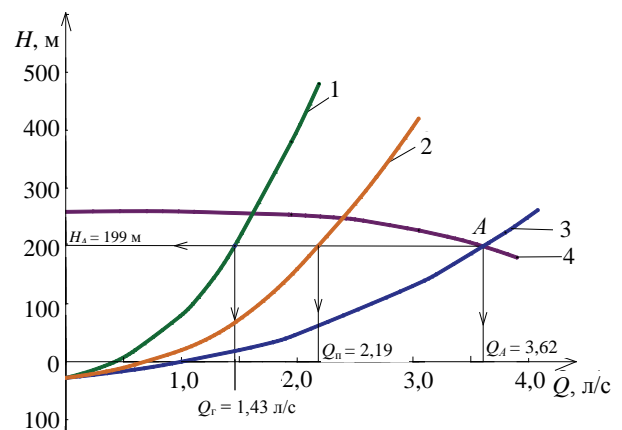


Рис. 5. Характеристики совместной работы рабочего насоса и трубопроводов (стальные трубы): 1 –  $H_{\text{г.треб}} = f(Q)$ ; 2 –  $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$ ; 3 – характеристика совместной работы трубопроводов; 4 –  $H_{\text{н}} = f(Q)$  насоса ЭЦВ 6-10-235

Fig. 5. Characteristics of joint operation of working pump and pipelines (steel pipes): 1 –  $H_{\text{г.треб}} = f(Q)$ ; 2 –  $H_{\text{п.треб}} = f(Q)$ ; 3 – characteristics of joint work of pipelines; 4 –  $H_{\text{н}} = f(Q)$  of ЭЦВ 6-10-235-pump

*Анализ эффективности работы установки и расчет геометрических размеров гидроэлеватора.* При полностью открытом пробковом кране расход в подводящем трубопроводе (рис. 5)  $Q_1 = Q_{\text{п}} = 2,19$  л/с. Параметры подающего трубопровода: труба стальная внутренним диаметром  $d_4 = 0,05$  м, длина  $l_{\text{под}} = 80$  м,  $H = 25$  м. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Гидравлические характеристики гидроэлеватора при стальных трубах  
Hydraulic characteristics of hydraulic elevator with steel pipes

$v_2$ , м/с	$u$	$v_3$ , м/с	$v_1$ , м/с	$Q_3$ , м <sup>3</sup> /с	$d_3$ , м	$v_4$ , м/с	$H_{\text{под}}$ , м
4,2	0,28	48,05	60,3	0,00278	0,0086	1,42	76,5

Так как  $H_{\text{под}} = 76,5 \text{ м} > H_{\text{скв}} = 75,0 \text{ м}$ , то гидроэлеватор, работая в самом неблагоприятном режиме, способен поднять песок на поверхность. Геометрические размеры насоса-гидроэлеватора:  $l_k = 8d_3 = 8 \cdot 0,086 \approx 0,1 \text{ м}$ ;  $l' = 1,5d_1 = 1,5d_c = 1,5 \cdot 0,0068 = 0,01 \text{ м}$ ;  $l_d = 7(d_4 - d_3) = 7 \cdot (0,05 - 0,0086) = 0,29 \text{ м}$ .

### ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета и подбора параметров технологического оборудования гидроэлеваторной установки, которая позволяет графоаналитическим методом подобрать рабочий насос, диаметры подводящего и гидромониторного трубопроводов при заданной глубине скважины, а затем, выполнив анализ эффективности работы установки, произвести корректировку размеров струйного насоса-гидроэлеватора и подающего трубопровода.

2. Приведены примеры расчета параметров установки, содержащей струйный насос-гидроэлеватор, подающий, подводящий и гидромониторный трубопроводы. Подобраны два варианта технологического оборудования (полипропиленовые и стальные трубы) для скважин глубиной 50 и 75 м. Полипропиленовые трубы в бухтах могут применяться при глубинах ремонтируемых скважин до 50 м, так как рассчитаны на предельное давление 1,6 МПа, создаваемое в рабочей точке А ( $H_A = 163 \text{ м}$ ) погружным насосом ЭЦВ 6-10-160. Для скважин глубиной 75 м необходимо использовать более высоконапорный погружной насос ЭЦВ 6-10-235 и стальные составные трубы, которые обеспечат надежность конструкции при большем давлении.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д. Н. Башкатов [и др.]. М.: Недра, 1988. 268 с.
2. Гидроэлеватор: а. с. СССР № 1173076 / В. А. Романов, Н. А. Богомолов. Оpubл. 15.08.1985.
3. Лабораторные испытания гидроэлеватора для извлечения песчаных пробок из скважин / В. В. Ивашечкин [и др.] // Наука – образованию, производству, экономике: матер. 11-й Междунар. науч.-практ. конф.: в 4 т. / редкол.: Б. М. Хрусталев [и др.]. Минск: БНТУ, 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. Murzakhmetov, V. Методика расчетного моделирования режимов работы струйного насоса для транспортировки продуктивных растворов урана / В. Murzakhmetov, S. Toktamissova, A. Sladkowski // Transport Problems 2020: Proceedings XII International Scientific Conference IX International Symposium of Young Researchers / ed. of Chief A. Sladkowski. Gliwice: Silesian University of Technology, 2020. С. 528–538.
10. Калачев, В. В. Струйные насосы. Теория, расчет и проектирование / В. В. Калачев. М.: Филинь, Омега-Л, 2017. 418 с.
11. 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>.
12. Carpenter, C. 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>.
13. 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>.
14. Медведева, Ю. А. Двухуровневая скважина для забора подземных вод / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, Е. С. Сацута // Вода. Газ. Тепло 2020: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Белор. нац. техн. ун-та, 100-летию каф. «Гидротехнич. и энергетическое стр-во, водный транспорт и гидравлика», 90-летию каф. «Теплогасоснаб. и вентиляция» /



- редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. Минск: БНТУ, 2020. С. 188–192.
15. Водозаборная скважина: пат. ВУ 23608 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. Опубл. 30.12.2021.
  16. Медведева, Ю. А. Определение КПД насоса-гидроэлеватора / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Респуб. науч.-техн. конф. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. С. 91–95.
  17. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. 11-е изд., доп. М.: Бастет, 2016. 428 с.
  18. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под. ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 238 с.
- Поступила 22.03.2022  
Подписана в печать 24.05.2022  
Опубликована онлайн 29.07.2022
- REFERENCES
1. Bashkatov D. N., Drakhlis S. L., Safonov V. V., Kvashnin G. P. (1988) Special Works in Drilling and Equipment of Water Wells. Moscow, Nedra Publ. 268 (in Russian).
  2. Romanov V. A., Bogomolov N. A. (1985) *Hydraulic Elevator*. USSR Inventor's Certificate No 1173076 (in Russian).
  3. Ivashechkin V. V., Avtushko P. A., Kurch A. N., Antipova A. A., Rud'man N. A., Bobkova Yu. A. (2013) Laboratory Tests of a Hydraulic Elevator for Extracting Sand Plugs From Wells. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Mater. 11-i Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University, 109 (in Russian).
  4. Kamenev P. N. (1964) *Hydraulic Elevators in Construction*. Moscow, Stroyizdat Publ. 403 (in Russian).
  5. Sokolov E. A., Zinger N. M. (1970) Inkjet Devices. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
  6. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B., Baibakov O. V., Kirillovskii Yu. L. (1982) *Hydraulics, Hydraulic Machines and Hydraulic Drives*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 423 (in Russian).
  7. Sizov G. N. (1976) *Hydraulic Calculations of Special Systems of River Tankers*. Leningrad, Sudostroenie Publ. 288 (in Russian).
  8. Lyamaev B. F. (1988) *Hydrojet Pumps and Installations*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 268 (in Russian).
  9. Myrzakhmetov B., Toktamissova S., Sładkowski A. (2020) Method for Computational Modeling of Jet Pump Operation Modes for Transport of Productive Uranium Solutions. *Transport Problems 2020: Proceedings XII International Scientific Conference IX International Symposium of Young Researchers*. Gliwice, Silesian University of Technology, 528–538 (in Russian).
  10. Kalachev V. V. (2017) *Jet Pumps. Theory, Calculation and Design*. Moscow, Filin, Omega-L Publ. 418 (in Russian).
  11. Panevnyk D. A., Panevnyk 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).
  12. 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>.
  13. Ivashechkin V. V. (2016) Hydraulic Elevator Installation Estimation for the Water Source Well Sand-Pack Cleaning-Up. *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. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-79-90> (in Russian).
  14. Medvedeva Yu. A., Ivashechkin V. V., Satsuta E. S. (2020) Two-Level Well for Groundwater Intake. *Voda. Gaz. Teplo 2020: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-Letiyyu Belor. Nats. Tekhn. Un-ta, 100-Letiyyu Kaf. «Gidrotekhnich. i Energeticheskoe Str-vo, Vodnyi Transport i Gidravlika», 90-Letiyyu Kaf. «Teplogazosnab. i Ventilyatsiya»* [Water. Gas. Heat 2020: Proceedings of Scientific and Technical Conference Dedicated to the 100<sup>th</sup> Anniversary of the Belarusian National Technical University, 100<sup>th</sup> Anniversary of the Department of Hydrotechnical and Energy Construction, Water Transport and Hydraulics”, 90<sup>th</sup> Anniversary of the Department – “Heat and Gas Supply and Ventilation”]. Minsk, Belarusian National Technical University, 188–192 (in Russian).
  15. Ivashechkin V. V., Medvedeva Yu. A. (2021) *Water Well*. Patent BY No 23608 (in Russian).
  16. Medvedeva Yu. A., Ivashechkin V. V., Sheyko A. M. (2021) Determination of the Efficiency of the Pump-Hydroelevator. *Innovatsionnye Tekhnologii v Vodnom, Kommunal'nom Khozyaistve i Vodnom Transporte: Materialy Respub. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovative Technologies in Water, Utilities and Water Transport: Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 91–95 (in Russian).
  17. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes. 11<sup>th</sup> ed. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).
  18. Kiselev P. G., Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. *Handbook of Hydraulic Calculations*. Moscow, Energiya Publ. 238 (in Russian).
- Received: 22.03.2022  
Accepted: 24.05.2022  
Published online: 29.07.2022

## Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании

### Часть 2. Результаты расчета

Канд. техн. наук, доц. О. В. Козунова<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** Предлагаемая статья является продолжением представленной ранее публикации автора в развитие теории и методики расчета гибких ортотропных железобетонных плит на упругом основании с учетом физической нелинейности материала плит. В статье приводятся численные результаты упругого и нелинейного расчетов изолированной прямоугольной ортотропной плиты на упругом основании (под действием внешней статической нагрузки с учетом собственного веса железобетонной плиты), моделируемом упругим однородным изотропным слоем, жестко соединенным с недеформируемым основанием. В расчете исследуемой конструкции учитывалось изменение ее жесткости в момент трещинообразования и дальнейшего активного раскрытия трещин. Расчет гибкой ортотропной плиты на упругом основании в нелинейной постановке выполнялся итерационным путем методом Б. Н. Жемочкина. Для определения коэффициентов канонических уравнений и свободных членов был использован смешанный метод строительной механики. На первой итерации железобетонная плита рассчитывалась как линейно-упругая, однородная и ортотропная, на последующих – как линейно-упругая, неоднородная и ортотропная на каждом участке Жемочкина. Прогибы плиты с защемленной нормалью в основной системе смешанного метода от действия сосредоточенной силы определялись методом Ритца при представлении прогибов в виде степенного полинома в новом оригинальном выражении, которое автор предложил впервые в части 1 статьи. Алгоритм решения реализован при помощи компьютерной программы Wolfram Mathematica 11.3. Приведены численные и графические результаты упругого и нелинейного расчетов осадок дорожной железобетонной плиты, контактных напряжений и эпюры изгибающих моментов в плите.

**Ключевые слова:** гибкая ортотропная железобетонная плита, метод Жемочкина, упругий слой, нелинейный расчет, зависимость «жесткость – кривизна», метод Ритца, трещинообразование, дорожная железобетонная плита, осадки, контактные напряжения, изгибающие моменты

**Для цитирования:** Козунова, О. В. Совершенствование методики расчета гибких ортотропных плит на упругом основании. Часть 2: Результаты расчета / О. В. Козунова // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 4. С. 290–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-4-290-296>

## Improvement of Calculation Technique for Flexible Orthotropic Plates on Elastic Base

### Part 2. Calculation Results

O. V. Kozunova<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** The proposed paper is a continuation of the author's theoretical work presented earlier in the development of the theory and methodology for calculating flexible orthotropic reinforced concrete plates on an elastic foundation, taking into account the physical nonlinearity of the plate material. The paper presents numerical results of elastic and nonlinear calculations of an isolated rectangular orthotropic plate on an elastic foundation, modeled by an elastic homogeneous isotropic layer

---

#### Адрес для переписки

Козунова Оксана Васильевна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-04  
kozunova@gmail.com

#### Address for correspondence

Kozunova Oksana V.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-04  
kozunova@gmail.com