

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286>

УДК 628.12

Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования

В. В. Ивашечкин¹⁾, В. И. Крицкая¹⁾, В. Н. Ануфриев¹⁾, О. А. Аврутин²⁾

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

²⁾УП «Минскводоканал» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Снижение напорной характеристики погружного насоса в процессе эксплуатации происходит в результате совокупного действия ряда причин. Насосное оборудование изнашивается вследствие гидроабразивного разрушения проточных каналов. Снятие характеристик погружных насосов производится в заводских условиях на специальных стендах. На крупных групповых водозаборах подземных вод скважины оборудованы автоматизированной системой управления, позволяющей тестировать насос на рабочем месте и оперативно принимать решение о его замене при недопустимом снижении напорной характеристики. Фактическую напорную характеристику насоса $H^H = f(Q)$ с достаточной степенью точности можно построить непосредственно на скважине. Для определения степени износа насоса производится сравнение его напорных характеристик до установки и в момент снятия показаний. В статье описана схема обвязки скважины для измерения удельного дебита и напорной характеристики погружного насоса. Цель исследования – вывести зависимость для построения расходно-напорной характеристики погружного насоса на его рабочем месте и разработать методику учета его износа в процессе работы, позволяющую прогнозировать снижение производительности скважин во времени. Предложено выражение для описания напорной характеристики насоса в любой момент времени, исчисляемый от его установки в скважину. Приведен анализ снижения напорных характеристик насосов различных производителей на скважинах действующего водозабора подземных вод. Подтверждено, что интенсивность снижения напора зависит от продолжительности эксплуатации насоса на данной скважине, материала рабочих колес насоса и содержания песка в перекачиваемой воде.

Ключевые слова: погружной насос, снижение напорной характеристики, износ скважинного насоса, испытание насоса на рабочем месте, манометр

Для цитирования: Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286>

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
fes@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
fes@bntu.by

Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment

V. V. Ivashchkin¹, V. I. Krytskaya¹, V. N. Anufriev¹, O. A. Avrutin²

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

²UE "Minskvodokanal" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The reducing in the pressure characteristic of the submersible pump during operation occurs as a result of the combined action of a number of reasons. Pumping equipment wears out due to waterjet destruction of flow channels. The characteristics of submersible pumps are captured at the factory on special stands. At large group groundwater intakes, wells are equipped with an automated control system that allows testing the pump at the workplace and promptly making a decision on its replacement if the pressure characteristic is unacceptably reduced. The actual pressure characteristic of the pump $H^H = f(Q)$ can be plotted directly in the well with a sufficient degree of accuracy. To determine the degree of wear of the pump, its pressure characteristics are compared before installation and at the time of taking readings. The article describes a well strapping scheme for measuring the specific flow rate and pressure characteristics of a submersible pump. The purpose of the study is to derive a dependency for constructing the flow-pressure characteristics of a submersible pump at its workplace and to develop a method for accounting for its wear during operation, which allows predicting a decrease in well productivity over time. An expression is proposed to describe the characteristics of the pump at any time, calculated from its installation in the well. The analysis of the reducing in the pressure characteristics of pumps produced by various manufacturers in the wells of the existing water intake of underground water is presented. It is confirmed that the intensity of the pressure reduction depends on the duration of the pump operation in a given well, the material of the pump impellers and the sand content in the pumped water.

Keywords: submersible pump, pressure reduction, downhole pump wear, pump test at the workplace, pressure gauge

For citation: Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I., Anufriev V. N., Avrutin O. A. (2021) Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286> (in Russian)

Введение

Снижение напорной характеристики погружного насоса происходит в результате совокупного действия ряда причин (абразивный износ колес, увеличение зазоров между рабочим колесом и направляющим аппаратом и т. д.). Насосное оборудование изнашивается вследствие гидроабразивного разрушения проточных каналов. Согласно [1–8], погружной насос может терять ежемесячно 2–3 % первоначальной производительности вследствие физического износа деталей. Причем насосы, прошедшие один или несколько капитальных ремонтов, изнашиваются больше, чем новые.

Кривые изменения производительности насосов скважин во времени, обусловленного износом погружных насосов, показаны на рис. 1 [1].

Анализ кривых подтверждает, что интенсивность снижения дебита скважин с новыми насосами ниже, чем скважин с насосами после ремонта.

Процесс уменьшения дебита скважины при износе насоса проиллюстрирован на рис. 2. Напорно-расходная характеристика насоса перемещается из положения 4 в 5, тогда как характеристики скважины 1 и трубопровода 2, а также их суммарная характеристика 3 остаются неизменными. Рабочая точ-

ка A_1 смещается влево по кривой 3 в положение A_2 , что приводит к уменьшению подачи насоса, а значит, и фактического дебита скважины ($Q_{A2} < Q_{A1}$).

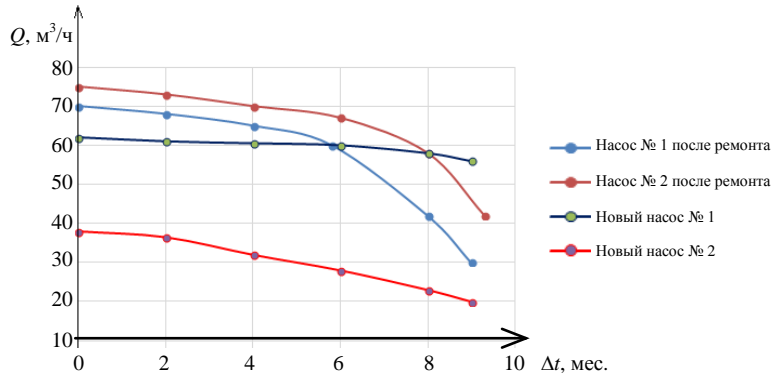


Рис. 1. Графики изменения производительности насосов скважин вследствие их износа

Fig. 1. Graphs of well pumps productivity over time due to its wear

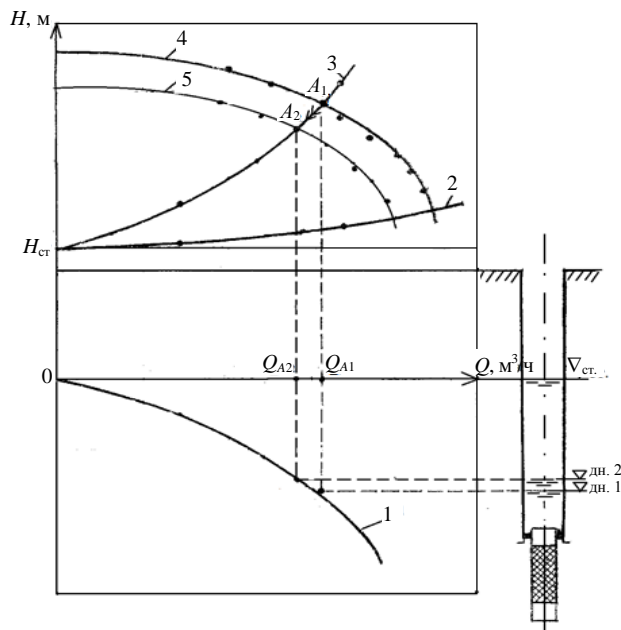


Рис. 2. Гидравлические характеристики: 1 – скважины; 2 – трубопровода; 3 – скважины и трубопровода; 4 – нового насоса; 5 – насоса вследствие износа

Fig. 2. Hydraulic characteristics of: 1 – well; 2 – pipeline; 3 – well and a pipeline; 4 – new pump; 5 – reduced pump performance due to wear

Как показывает опыт эксплуатации скважинных насосов различных производителей, около 80 % случаев выхода из строя связаны с поломкой электродвигателя. Кроме того, к снижению ресурса насоса приводит эксплуатация за пределами рабочего диапазона. Поэтому правильный подбор насоса позволяет обеспечить его функционирование в оптимальной точке рабочей характеристики с максимальным КПД и продлевает его срок службы [2].

Снятие характеристик погружных насосов производится в заводских условиях на специальных стендах согласно требованиям ГОСТ 6134 [9]. Давление измеряется манометром, установленным на выходе из водоподъемной трубы. Одновременно измеряются динамический уровень в колонне и подача воды водомером на напорном трубопроводе. ГОСТ 6134 также предусматривает возможность проведения приемочных испытаний насоса на рабочем месте с целью подтверждения его расчетных характеристик. В этом случае насос снабжают всеми необходимыми водоподъемными трубами, опускают в скважину и проводят испытания, оговоренные с покупателем. Потери напора в водоподъемных трубах определяют по формулам гидравлики.

На крупных групповых водозаборах подземных вод скважины оборудованы системой АСУ, предусматривающей установку водомера и двух датчиков давления (на устье и входе в линию подключения скважины к сборному водоводу), обеспечивающих мониторинг давления и расхода воды, подаваемой насосом в сборный водовод. Кроме этого, в стволе скважины смонтирован датчик, предназначенный для определения статического и динамического уровней воды. Дополнительно контролировать положение уровней можно с помощью электро- или пневмоуровнемера. Перечисленных приборов достаточно для тестирования насоса на рабочем месте и принятия решения о его замене при недопустимом снижении напорной характеристики. Фактическую напорную характеристику насоса $H^H = f(Q)$, показывающую степень его износа, с достаточной точностью можно построить непосредственно на скважине. Это позволит сэкономить время на демонтаж насоса, его транспортировку на испытательный стенд для тестирования.

Цель настоящей работы – вывести зависимость для построения расходно-напорной характеристики погружного насоса на скважине и разработать методику учета его износа в процессе работы.

Основная часть

Типичная схема обвязки скважины группового водозабора подземных вод, подающей воду на станцию обезжелезивания, представлена на рис. 3, где H – статический уровень воды, м; H_d – динамический уровень воды, м; S – понижение, м; $l_{тр}$ – длина трубки пневмоуровнемера, м; h' – расстояние от плиты оголовка до оси линии подключения, м; $h_{загл}$ – заглубление насоса под динамический уровень воды в скважине, м; h_n – высота насосной части агрегата, м. Насосная установка в достаточной степени укомплектована запорно-регулирующей арматурой (обратный клапан, задвижка) и контрольно-измерительной аппаратурой (манометры, датчики давления, водомер).

Напор H^H погружного насоса при снятии фактической напорной характеристики $H^H = f(Q)$ на рабочем месте найдем как разность полных удельных энергий E_1 за насосом в сечении 1–1 и E_3 на входе в насос в сечении 3–3 относительно плоскости сравнения 0–0, проходящей по уровню воды в скважине:

$$H^H = E_1 - E_3 = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left(z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \frac{\alpha v_3^2}{2g} \right), \quad (1)$$

где z_i – геометрическая высота, м; p_i – пьезометрическое давление; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – коэффициент Кориолиса; v_i – скорость движения жидкости в i -м сечении, м/с.

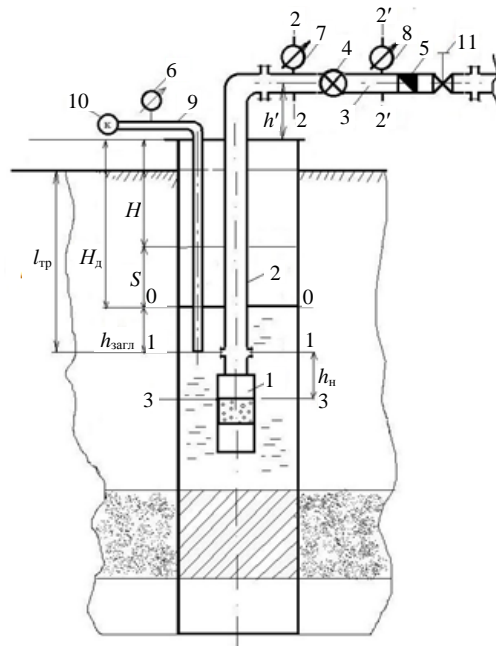


Рис. 3. Схема обвязки скважины для измерения удельного дебита и напорной характеристики погружного насоса: 1 – насос; 2 – водоподъемная труба; 3 – внутрискважинная труба; 4 – водомер; 5 – обратный клапан; 6–8 – манометры; 9 – пневмоуровнемер; 10 – компрессор; 11 – задвижка

Fig. 3. Borehole strapping scheme for measuring the specific flow rate and pressure characteristics of a submersible pump: 1 – pump; 2 – water lifting pipe; 3 – internal pipe; 4 – water meter; 5 – check valve; 6–8 – pressure gauges; 9 – pneumatic level gauge; 10 – compressor; 11 – gate valve

Согласно расчетной схеме (рис. 3) получим:

$$z_1 = -h_{\text{загл}}; p_1 = p_{1\text{ман}}; v_1 = v_{\text{вп}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вп}}}; z_3 = -h_{\text{загл}} - h_{\text{н}}; p_3 = p_{\text{вх}}; v_3 = v_{\text{вх}} \approx 0, \quad (2)$$

где $p_{1\text{ман}}$ – манометрическое давление, Па; $v_{\text{вп}}$ – скорость в водоподъемной трубе, м/с; Q – подача насоса, м³/ч; $\omega_{\text{вп}}$ – площадь сечения водоподъемной трубы, м²; $p_{\text{вх}}$ – давление на входе в насос, Па; $v_{\text{вх}}$ – скорость на входе в насос, м/с.

Из рис. 3 следует, что в сечении 3–3 пьезометрическая высота $\frac{p_3}{\rho g}$ численно равна по абсолютной величине геометрической высоте z_3 , но относительно плоскости отсчета 0–0 они имеют разные знаки и их сумма равна нулю

$$z_3 + \frac{p_3}{\rho g} = (-h_{\text{загл}} - h_{\text{н}}) + \frac{p_3}{\rho g} = 0. \quad (3)$$

Чтобы найти давление $p_{1\text{ман}}$ в сечении 1–1, запишем уравнение Д. Бернулли для сечения 1–1 на выходе из насоса и сечения 2–2, проходящего через точку подключения манометра 7, относительно плоскости сравнения 0–0, совпадающей с динамическим уровнем

$$z_1 + \frac{p_{1\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \sum h_{\text{тр}1-2}, \quad (4)$$

где $\sum h_{\text{тр}1-2}$ – потери на трение в трубе на участке 1–2.

Тогда согласно схеме (рис. 3) получим:

$$\begin{aligned} z_1 &= -h_{\text{загл}}; p_1 = p_{1\text{ман}}; v_1 = v_{\text{вп}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вп}}}; \\ z_2 &= H_{\text{д}} + h'; p_2 = p_{2\text{ман}}; v_2 = v_{\text{вст}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вст}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $v_{\text{вст}}$ – скорость во внутростанционном трубопроводе, м/с; $\omega_{\text{вст}}$ – площадь сечения во внутростанционном трубопроводе, м².

Подставив (5) в (4), получим выражение для пьезометрического напора насоса $\frac{p_{1\text{ман}}}{\rho g}$ в сечении 1–1

$$\frac{p_{1\text{ман}}}{\rho g} = H_{\text{д}} + h_{\text{загл}} + h' + \sum h_{\text{тр}1-2} + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}. \quad (6)$$

После подстановки (2), (3), (6) в (1) и преобразований получим выражение для напора насоса

$$H^{\text{н}} = H_{\text{д}} + h' + \sum h_{\text{тр}1-2} + \frac{p_{2\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}. \quad (7)$$

Потери напора $\sum h_{\text{тр}1-2}$ на участке 1–2 складываются из потерь по длине $h_{\text{дл}}$ и на местных сопротивлениях $h_{\text{м}}$

$$\sum h_{\text{тр}1-2} = h_{\text{дл}} + h_{\text{м}} = A_{\text{вп}} l_{\text{вп}} Q^2 + \zeta_{\text{пов}} Q^2 / (2g \omega_{\text{вст}}^2), \quad (8)$$

где $A_{\text{вп}}$ – удельное сопротивление водоподъемной трубы; $l_{\text{вп}}$ – длина водоподъемной трубы, м; $\zeta_{\text{пов}}$ – коэффициент местного сопротивления поворота внутростанционного трубопровода, принимается по справочнику [10].

В случае, если манометр 7 в сечении 2–2 отсутствует, а есть манометр 8 в сечении 2'–2', в расчете напора насоса $H^{\text{н}}$ необходимо учесть потери напора на водомере $h_{\text{вод}}$ (зависят от расхода $h_{\text{вод}} = f(Q)$, определяются по заводским паспортным характеристикам)

$$H^{\text{н}} = H_{\text{д}} + h' + \sum h_{\text{тр}1-2'} + h_{\text{вод}} + \frac{p_{2'\text{ман}}}{\rho g} + \frac{\alpha v_{\text{вст}}^2}{2g} - \frac{\alpha v_{\text{вп}}^2}{2g}. \quad (9)$$

Если зазоры между фланцами (муфтами) водоподъемных труб слишком малы для спуска электрода электроуровнемера, динамический уровень воды $H_{\text{д}}$ определяют с помощью пневмоуровнемера (рис. 3). Он представляет собой пластиковую трубку с внутренним диаметром порядка 8 мм. Нижний конец трубки жестко закреплен на водоподъемной трубе выше насоса, а верхний выведен на оголовок скважины. При замере уровня воды в сква-

жине к верхнему концу подключают компрессор или ручной пневмонасос с манометром и подают в трубку воздух, наблюдая за положением стрелки манометра на выходе пневмонасоса. Максимальное давление p_{\max}^* фиксируют. Динамический уровень вычисляют по формуле

$$H_d = l_{\text{тр}} - h_{\text{загл}} = l_{\text{тр}} - p_{\max}^* / \rho g. \quad (10)$$

Аналогично определяют положение статического уровня H при выключенном насосе.

Для построения напорной характеристики насоса ступенчато изменяют его подачу с помощью задвижки и фиксируют показания манометра в сечении 2–2 или 2'–2', водомера, пневмоуровнемера (рис. 3). Напор насоса вычисляют по формулам (7) или (9).

Для оценки степени снижения напорной характеристики насоса в результате износа в общей координатной сетке наносят характеристику $H_0^H = f(Q)$, снятую на заводе-изготовителе (паспортную характеристику, если насос новый) или на стенде ремонтных мастерских эксплуатирующей организации (если насос после ремонта) перед установкой на скважину. Затем ее сравнивают с характеристикой насоса $H_{\text{обсл}}^H = f(Q)$, снятой на рабочем месте. Если $H_{\text{обсл}}^H = f(Q)$ ниже $H_0^H = f(Q)$, имеет место некоторый износ насоса.

В статье проанализированы насосы, установленные на скважинах водозабора № 2 «Петровщина» г. Минска.

Напорные характеристики погружного насоса Wilo-EMU K85-3+NU501-2/22, установленного на скважине № 4в, представлены на рис. 4. Насос повергался испытаниям: 03.10.2018 – на гидравлическом стенде в ремонтно-механическом цехе (РМЦ) УП «Минскводоканал» (кривая 1); 28.05.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2); 30.08.2019 – на том же гидравлическом стенде (кривая 3).

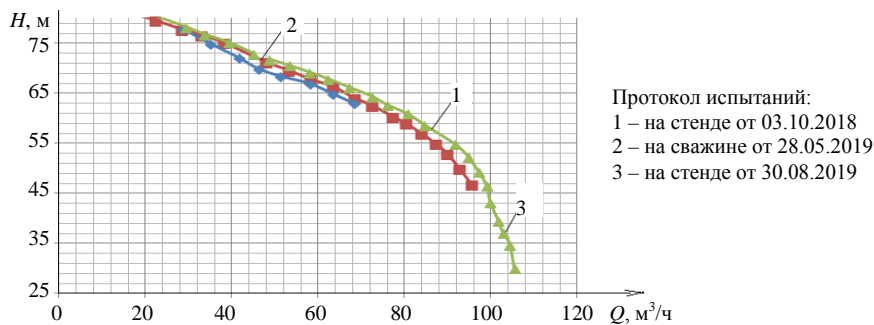


Рис. 4. Графики напорных характеристик насоса Wilo-EMU K85-3+NU501-2/22 на скважине № 4в

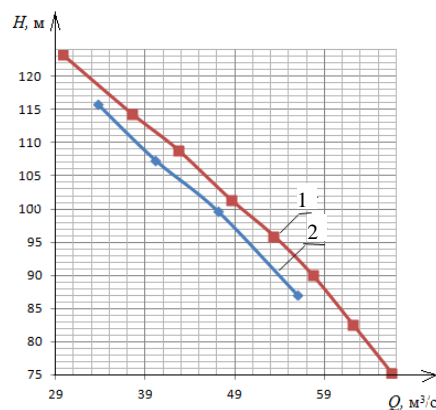
Fig. 4. Graphs of the pressure characteristics of the Wilo-EMU K85-3+NU501-2/22 pump at the well No 4c

Таким образом, расхождение графиков напорных характеристик составляет не более 1,5 м. Это значит, что методика испытаний насоса в скважине может использоваться эксплуатирующей организацией.

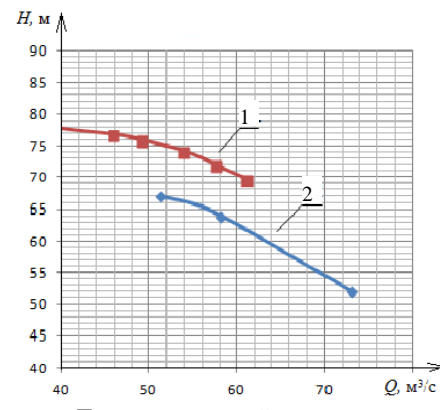
Снижение напорных характеристик погружных насосов вследствие износа представлено на рис. 5.

Погружной насос SAER SPC151-B/9 (производство Италия), оснащенный чугунными рабочими колесами, установлен на скважине № 8а (рис. 5). Повергался испытаниям: 17.07.2014 – на гидравлическом стенде в РМЦ УП «Минскводоканал» перед установкой на скважину (кривая 1); 21.05.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2). Анализ кривых показывает, что за 4 года и 10 месяцев напорная характеристика снизилась на 4,5 м.

Погружной насос ЭЦВ 10-65-65 (производство г. Ливны) с рабочими колесами из нержавеющей стали установлен на скважине № 12б (рис. 6). Повергался испытаниям: 09.02.2018 – на гидравлическом стенде в РМЦ УП «Минскводоканал» перед установкой на скважину (кривая 1); 19.06.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2). Анализ положения кривых показывает, что за 1 год и 4 месяца напорная характеристика снизилась на 8 м.



Протокол испытаний:
1 – на стенде от 17.07.2014
2 – на скважине от 21.05.2019



Протокол испытаний:
1 – на стенде от 09.02.2018
2 – на скважине от 19.06.2019

Рис. 5. Графики напорных характеристик насоса SPC151-B/9 на скважине № 8а

Fig. 5. Graphs of the pressure characteristics of the SPC151-B/9 pump in the well No 8а

Рис. 6. Графики напорных характеристик насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 12б

Fig. 6. Graphs of the pressure characteristics of the ECV 10-65-65 pump in the well No 12b

Напорные характеристики погружного насоса ЭЦВ 10-65-65, установленного на скважине № 10в, представлены на рис. 7. Повергался испытаниям: 31.08.2018 – на гидравлическом стенде в РМЦ УП «Минскводоканал» перед установкой на скважину (кривая 1); 17.05.2019 – на рабочем месте по предлагаемой методике (кривая 2).

Аппроксимируем кривую 1 (рис. 7) полиномиальной зависимостью вида

$$H_0^n = c - aQ^2 - bQ, \quad (11)$$

где c – некоторый фиктивный напор насоса; a , b – коэффициенты кривой, характеризующие фиктивное гидравлическое сопротивление.

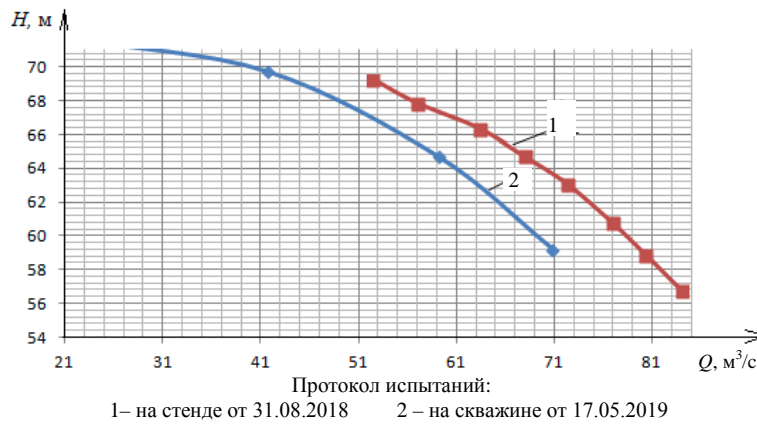


Рис. 7. Графики напорных характеристик насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 10в
 Fig. 7. Graphs of the pressure characteristics of the ECV 10-65-65 pump in the well No 10с

Определяют амплитуду снижения напора $\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}}$ как среднее арифметическое значений расстояний по вертикали ΔH_i^{H} между указанными характеристиками при нескольких расходах Q_i в зоне максимальных КПД

$$\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}} = \frac{\sum_i^n \Delta H_i^{\text{H}}}{n}. \quad (12)$$

Тогда выражение для характеристики насоса $H_{\text{обсл}}^{\text{H}}$ на момент обследования можно представить в виде

$$H_{\text{обсл}}^{\text{H}} = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}}}{c} \right) c - aQ^2 - bQ. \quad (13)$$

Снижение напора $\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}}$, характеризующее износ насоса, зависит от продолжительности его эксплуатации на данной скважине. На другой скважине интенсивность снижения напора может быть иной в силу различий в химическом составе подземных вод, содержании песка в перекачиваемой воде, частоте включений насоса и т. д. [10].

При наличии данных наблюдений в различные моменты времени за снижением напорной характеристики насоса можно получить эмпирическую зависимость $\Delta H^{\text{H}} = f(t)$ вида

$$\Delta H_i^{\text{H}} = \Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}} e^{\psi t}, \quad (14)$$

где ψ – коэффициент интенсивности снижения напора насоса, зависящий от его марки (для определения ψ необходимо провести не менее двух обследований).

Это дает возможность делать прогноз изменения напорной характеристики насоса через заданный промежуток времени t , отсчитываемый от момента обследования. Тогда с учетом (11) и (12) получим

$$H_t^{\text{H}} = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{обсл}}^{\text{H}} e^{\psi t}}{c} \right) c - aQ^2 - bQ. \quad (15)$$

Фактическое время работы насоса на скважине можно получить из соответствующих отчетов. Так, исходя из данных отчета по работе насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 10в (табл. 1), из теоретически возможных 10224 моточасов он отработал всего 6709. Продолжительность работы в годах определяется по выражению

$$t_{\text{факт}} / 8760 = t, \quad (16)$$

где $t_{\text{факт}}$ – фактическое количество часов работы; 8760 – количество моточасов в одном году.

Данные о работе насосов марки ЭЦВ 10-65-65 на скважинах № 12б и 10в представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные о работе насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважинах № 12б и 10в
Data on the operation of the ECV 10-65-65 pump in the wells No 12b and 10c

Дата	Фактическое количество часов работы $t_{\text{факт}}$		Теоретическое количество часов работы $t_{\text{теор}}$	
	12б	10в	12б	10в
2018 г.				
Март	618	–	744	–
Апрель	598	–	720	–
Май	676	–	744	–
Июнь	281	–	720	–
Июль	76	–	744	–
Август	273	–	744	–
Сентябрь	120	217	720	720
Октябрь	17	207	744	744
Ноябрь	50	429	720	720
Декабрь	369	636	744	744
2019 г.				
Январь	190	611	744	744
Февраль	31	299	672	672
Март	17	352	744	744
Апрель	20	330	720	720
Май	391	533	744	744
Июнь	428	604	720	720
Июль	236	680	744	744
Август	134	417	744	744
Сентябрь	145	699	720	720
Октябрь	640	695	744	744
Всего	5310	6709	14640	10224

Исходя из данных табл. 1, продолжительность работы насоса ЭЦВ 10-65-65 на скважине № 10в составляет 0,77 года; на скважине № 12б – 0,61 года.

Кроме того, выявлено, что износ указанных насосов не одинаков [11]. Так, напорная характеристика насоса на скважине № 10в за 0,77 года снизилась на 4 м; насоса на скважине № 12б за 0,61 года – на 8 м. Большая степень износа вызвана тем, что скважина № 12б некоторое время песковала.

Фактическое снижение КПД насосов определялось по формуле

$$\eta_n = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{потр}}} \cdot 100 \% = \frac{\rho g Q H}{\eta_{\text{дв}} \sqrt{3} I U \cos \varphi} \cdot 100 \%, \quad (17)$$

где $N_{\text{пол}}$, $N_{\text{потр}}$ – полезная и потребляемая мощности насоса соответственно, Вт; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя; I – сила тока, А; U – напряжение, В; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Полезную мощность определяли по снятой на скважине напорной характеристике насоса, потребляемую – по данным АСУ водозабора.

Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные расчетов степени снижения КПД насосов модели ЭЦВ 10-65-65
 на скважинах № 10в и 12б

Data of the calculation of the degree of decrease in efficiency of ECV 10-65-65
 pumps in the wells No 10c and 12b

Номер скважины	Дата замеров	Подача насоса Q , м ³ /ч	Динамический уровень $H_{\text{дв}}$, м	Полезная мощность насоса $N_{\text{пол}}$, Вт	Потребляемая мощность насоса $N_{\text{потр}}$, Вт	КПД двигателя $\eta_{\text{дв}}$, %	Степень снижения КПД, %
10в	31.08.18	63,33	66,37	11,72	21,15	55,40	31,8
	17.05.19	72,33	59,00	10,49	27,80	37,73	
12б	09.02.18	65,23	66,03	11,44	22,74	50,31	44,6
	19.06.19	67,60	57,00	11,62	41,70	27,87	

ВЫВОДЫ

1. Получена аналитическая зависимость для определения напора погружного насоса, установленного в водозаборной скважине, и разработана методика снятия энергетических характеристик насоса на его рабочем месте.

2. Приведен анализ снижения напорных характеристик насосов различных производителей на скважинах действующего водозабора подземных вод. Подтверждено, что интенсивность снижения напора зависит от продолжительности эксплуатации насоса на данной скважине, материала рабочих колес насоса и содержания песка в перекачиваемой воде.

3. Разработана методика учета износа погружных насосов с целью прогноза снижения производительности скважин в процессе работы. Предложено выражение для описания характеристики насоса H_t^n в любой момент времени, исчисляемый от его установки в скважину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугай, А. М. Водоснабжение из подземных источников / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. Киев: Урожай, 1990. 264 с.
2. Наладка и интенсификация работы городских систем подачи и распределения воды / И. В. Кожин [и др.]. М.: Стройиздат, 1978. 112 с.
3. Кикачейшвили, Г. Е. Методология оптимизации систем подачи и распределения воды / Г. Е. Кикачейшвили. Тбилиси: Техн. ун-т, 2002. 180 с.
4. Карамбиров, С. Н. Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации / С. Н. Карамбиров. М., 2005. 46 с.

5. Веремениук, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Веремениук, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>.
6. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение / Н. Н. Абрамов. М.: Стройиздат, 1982. 440 с.
7. Эгильский, И. С. Основные направления интенсификации работы городских систем подачи и распределения воды / И. С. Эгильский, И. В. Кожин // Интенсификация и оптимизация городских и промышленных водопроводов: материалы семинара. М.: МДНТИ имени Ф. Э. Дзержинского, 1973. С. 3–9.
8. Рекомендации по сокращению потерь воды в жилищном хозяйстве. М.: ОНТИ АКХ, 1977. 27 с.
9. Насосы динамические. Методы испытаний: ГОСТ 6134–2007 (ИСО 9906:1999). М.: Стандартинформ, 2008.
10. Федоров, Н. Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / Н. Ф. Федоров, А. М. Курганов. Л.: Стройиздат, 1973.
11. Иванова, И. Е. Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин, В. В. Веремениук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92>.

Поступила 03.06.2020 Подписана в печать 11.08.2020 Опубликовано онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Tugai A. M., Prokopchuk I. T. (1990) *Water Supply from Underground Sources*. Kiev, Urozhai Publ. 264 (in Russian).
2. Kozhiniv I. V., Kolesov V. V., Maizel's M. P., Egil'skii I. S. (1978) *Commissioning and Intensification of Urban Water Supply and Distribution Systems*. Moscow, Stroizdat Publ. 112 (in Russian).
3. Kikacheishvili G. E. (2002) *Methodology of Optimization of Water Supply and Distribution Systems*. Tbilisi, Technical University. 180 (in Russian).
4. Karambirov S. N. (2005) *Improvement of Methods for Calculating Water Supply and Distribution Systems in Conditions of Multiple Modes and Incomplete Initial Information*. Moscow. 46 (in Russian).
5. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian).
6. Abramov N. N. (1982) *Water Supply*. Moscow, Stroizdat Publ. 440 (in Russian).
7. Egil'skii I. S., Kozhinov I. V. (1973) Main Directions of Intensification of Urban Water Supply and Distribution Systems. *Intensification and Optimization of Urban and Industrial Water Pipes: Workshop Proceedings*. Moscow, Moscow House of Scientific and Technical Popularization named after F. E. Dzerzhinskii. 3–9 (in Russian).
8. *Recommendations for Reducing Water Losses in Housing*. Moscow, 1977. 27 (in Russian).
9. State Standart 6134–2007 (ISO 9906:1999) *Dynamic Pumps. Test Methods*. Moscow, Standartinform Publ. 2008 (in Russian).
10. Fedorov N. F., Kurganov A. M. (1973) *Handbook of Hydraulic Calculations of Water Supply and Sewerage Systems*. Leningrad, Stroizdat Publ.
11. Ivanova I. E., Ivashchkin V. V., Veremenyuk V. V. (2018) Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 80–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92> (in Russian).

Received: 3 June 2020

Accepted: 11 August 2020

Published online: 31 May 2021