

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462>

УДК 628.112

Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин

В. В. Ивашечкин¹⁾, Ю. А. Медведева¹⁾

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

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

Реферат. Среднее количество скважин на типичном водозаборе 30–40 шт., мощность погружного насоса обычно 32–40 кВт, из чего следует, что только на одном скважинном водозаборе потребляемая мощность электронасосного оборудования в часы наибольшего водопотребления может достигать 900–1600 кВт. В структуре эксплуатационных затрат скважинных водозаборов доля затрат на электроэнергию достигает 85 %. С учетом требований по снижению издержек и тарифов на воду предприятий жилищно-коммунального хозяйства и водоканалов энергосбережение является актуальной задачей. В статье рассмотрена оптимизация работы водозаборов подземных вод с неравномерной водоподачей за счет применения двухколонных водозаборных скважин вместо типовых одноколонных. Показано, что использование мощных насосов в одноколонных скважинах таких водозаборов приводит к резким снижениям динамического уровня воды в стволе скважины. Это, с одной стороны, провоцирует образование коагулирующих отложений в фильтрах за счет их аэрации, снижает удельный дебит скважины и сокращает интервалы между регенерациями, а с другой – увеличивает геометрический напор погружных насосов и энергозатраты на подъем воды. Рассмотрены теоретические основы определения подачи насосов, установленных в одно- и двухколонных водозаборных скважинах, подающих воду на напорный фильтр станции водоподготовки. Приведен пример сравнительного анализа работы одной рабочей скважины с одним мощным насосом в составе водозабора из двух одноколонных скважин (рабочей и резервной) для покрытия всего графика водоподдачи и двух двухколонных рабочих скважин, содержащих по одному менее мощному насосу в каждой колонне. Исследована энергоэффективность указанных насосных систем. В результате расчетов установлено, что при комбинировании работы насосов двухколонных скважин в периоды пиковой, основной и частичной нагрузок годовая экономия электроэнергии составит 33 %.

Ключевые слова: водоснабжение, скважина, потребитель, насос, коагуляция, водозабор, электропотребление, энергоэффективность

Для цитирования: Ивашечкин, В. В. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Optimization of the Operation of Groundwater Intakes Using Two-Column Wells

V. V. Ivashechkin¹⁾, J. A. Medvedeva¹⁾

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

Abstract. The average number of wells at a typical water intake is 30–40, while the power of the submersible pump is usually 32–40 kW, which means that only at one well water intake the power consumption of electric pumping equipment during the hours of greatest water consumption can reach 900–1600 kW. In the structure of operating costs of well water intakes, the share of electricity costs reaches 85 %. Taking into account the requirements for reducing costs and water tariffs of housing and communal services enterprises as well as of water utilities, energy saving is an urgent task. The article considers the optimization of the operation of groundwater intakes with uneven water supply due to the use of two-column water intake wells instead of typical single-column ones. It is shown that the use of powerful pumps in single-column wells of such water intakes causes a sharp decrease in the dynamic water level in the borehole. On the one hand, this provokes the formation of colmating deposits in the filters due to their aeration, reduces the specific flow rate of the well and shortens the intervals between regenerations. On the other hand, this increases the geometric pressure of submersible pumps and energy consumption for lifting water. The theoretical foundations of determining the supply of pumps installed in single- and two-column water intake wells supplying water to the pressure filter of the water treatment plant are considered. An example of a comparative analysis of the operation of one working well with one powerful pump as part of a water intake of two single-column wells (working and reserve) to cover the entire water supply schedule and two two-column working wells containing one less powerful pump in each column is given. The energy efficiency of these pumping systems is investigated. As a result of calculations, it was found that when combining the operation of pumps of two-column wells during periods of peak, main and partial loads, the annual energy savings will amount to 33 %.

Keywords: water supply, well, consumer, pump, colmatation, water intake, power consumption, energy efficiency

For citation: Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A. (2022) Optimization of the Operation of Groundwater Intakes Using Two-Column Wells. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462> (in Russian)

Введение

В соответствии с Водной стратегией Республики Беларусь на период до 2030 г., утвержденной решением коллегии Минприроды от 11.08.2011 № 72-Р, подземные воды рассматриваются как единственный источник питьевого водоснабжения с геологической спецификой подземного залегания. Скважинные водозаборы подземных вод широко используются для водоснабжения сельских населенных пунктов, городских поселков, малых и крупных городов, мегаполисов. Численность потребителей в указанных населенных пунктах определяет число скважин водозабора, их производительность, схемы расположения и подключения к сборным водоводам. Только для водоснабжения г. Минска в УП «Минскводоканал» эксплуатируются 495 скважин, размещенных на 13 групповых водозаборах подзем-

ных вод. В структуре эксплуатационных затрат скважинных водозаборов доля расходов на электроэнергию достигает 85 %. С учетом требований по снижению издержек и тарифов на воду предприятий жилищно-коммунального хозяйства и водоканалов энергосбережение является актуальной задачей.

Эксплуатационные скважины на воду должны иметь конструкции, не только обеспечивающие начальную высокую производительность и высококачественное вскрытие продуктивных водоносных горизонтов с тщательной изоляцией их друг от друга, но и обладающие высокими эксплуатационными показателями: длительным сроком службы, низкими удельными энергозатратами на подъем воды, минимальным темпом снижения производительности, высокой ремонтпригодностью [1–6].

Кольматация фильтров снижает долговечность скважин и повышает удельные энергозатраты на подъем воды. Расчетный срок эксплуатации водозаборных скважин на заданную производительность составляет 15 лет, однако опыт показывает, что период их устойчивой работы значительно меньше. Кольматация фильтров сопровождается ростом напора насоса из-за снижения динамического уровня и, как следствие, повышением удельных энергозатрат на подъем воды из скважины.

Полностью предотвратить химическую кольматацию при заборе подземных вод с неустойчивым химическим составом нельзя, поскольку ее причиной является нарушение естественного режима водоносного пласта. Однако интенсивность кольматационных процессов снижается, если не допускать неравномерной эксплуатации скважин с большими понижениями уровней, приводящими к аэрации подземных вод, их поступлению в зону фильтра, где при появлении растворенного кислорода наблюдается переход железа из закисного в окисное с образованием железистых осадков [7].

В скважине, в которой в течение непродолжительного времени возникают резкие снижения динамического уровня воды, появление кольматирующих отложений вероятнее, чем в скважине, функционирующей на протяжении длительного периода с равномерной нагрузкой [8]. Исходя из сказанного, неблагоприятным режимом следует считать график подачи воды со значительным колебанием расходов в течение суток. Для оптимизации работы таких водозаборов подземных вод предложено устанавливать в одной скважине (если допускает ее диаметр) вместо одного мощного насоса два менее мощных (один – для основной нагрузки, второй – для пиковой) и комбинировать работу насосов нескольких скважин таким образом, чтобы обеспечивать потребный расход водозабора с минимальным понижением динамического уровня воды. В [8] на примере водозабора из двух скважин показано, что если каждую из них эксплуатировать глубинным насосом с подачей $200 \text{ м}^3/\text{ч}$ и зафиксировать затраты электроэнергии, а затем вместо одного мощного насоса установить по два с подачей по $50 \text{ м}^3/\text{ч}$, то каскадное включение параллельно работающих насосов обеих скважин позволит получить годовую экономию электрической энергии 33 %, сни-

зять интенсивность кольматационных процессов и продлить срок службы скважин. В БНТУ разработана конструкция двухколонной высокодебитной скважины [9, 10], позволяющей улучшить режимы работы группового водозабора и снизить удельные затраты на подъем воды.

Цель статьи – оптимизация работы водозаборов подземных вод с неравномерной водоподачей за счет применения двухколонных водозаборных скважин.

Основная часть

Когда невозможно обеспечить требуемый расход воды подачей одного насоса, появляется необходимость в параллельной работе нескольких одинаковых или разных насосов. Кроме того, поскольку водопотребление неравномерно по часам суток и по сезонам года, подача воды регулируется за счет количества одновременно работающих насосов.

Рассмотрим водозабор, состоящий из двух одноколоновых скважин (рабочей и резервной) (рис. 1).

Определим подачу воды одним рабочим насосом на напорный фильтр станции водоподготовки аналитическим способом. Напор погружного насоса H_n в функции расхода Q обычно аппроксимируют полиномиальной зависимостью

$$H_n = -aQ^2 - bQ + c, \quad (1)$$

где a – некоторый фиктивный напор насоса; b , c – коэффициенты кривой $H_n = f(Q)$ насоса, характеризующие его фиктивное гидравлическое сопротивление.

Если работает один из погружных насосов, его напор можно определить из уравнения

$$H_n = H_r + H_{ст} + s + h_{тр1} + h_{тр2} + h_{тр3} + h_{\phi}, \quad (2)$$

где H_r – высота от устья скважины до напорного фильтра станции водоподготовки; $H_{ст}$ – статический напор в скважине; s – понижения уровня воды в стволах скважины при работе насосов; $s = \frac{Q}{q}$; q – удельный дебит скважины;

$h_{тр1}$, $h_{тр2}$, $h_{тр3}$ – потери напора по длине соответственно в водоподъемной трубе длиной l_1 , линии подключения к сборному водоводу длиной l_2 и в сборном водоводе длиной l_3 ; h_{ϕ} – то же на напорном фильтре станции водоподготовки; $h_{\phi} = \zeta_{\phi} Q^2$, ζ_{ϕ} – коэффициент сопротивления напорного фильтра станции водоподготовки.

Потери напора в трубах:

$$h_{тр1} = A_1 l_1 Q^2; \quad h_{тр2} = A_2 l_2 Q^2; \quad h_{тр3} = A_3 l_3 Q^2,$$

где A_1 , A_2 , A_3 – соответственно удельные сопротивления водоподъемных труб первого и второго насосов, сборного водовода [11].

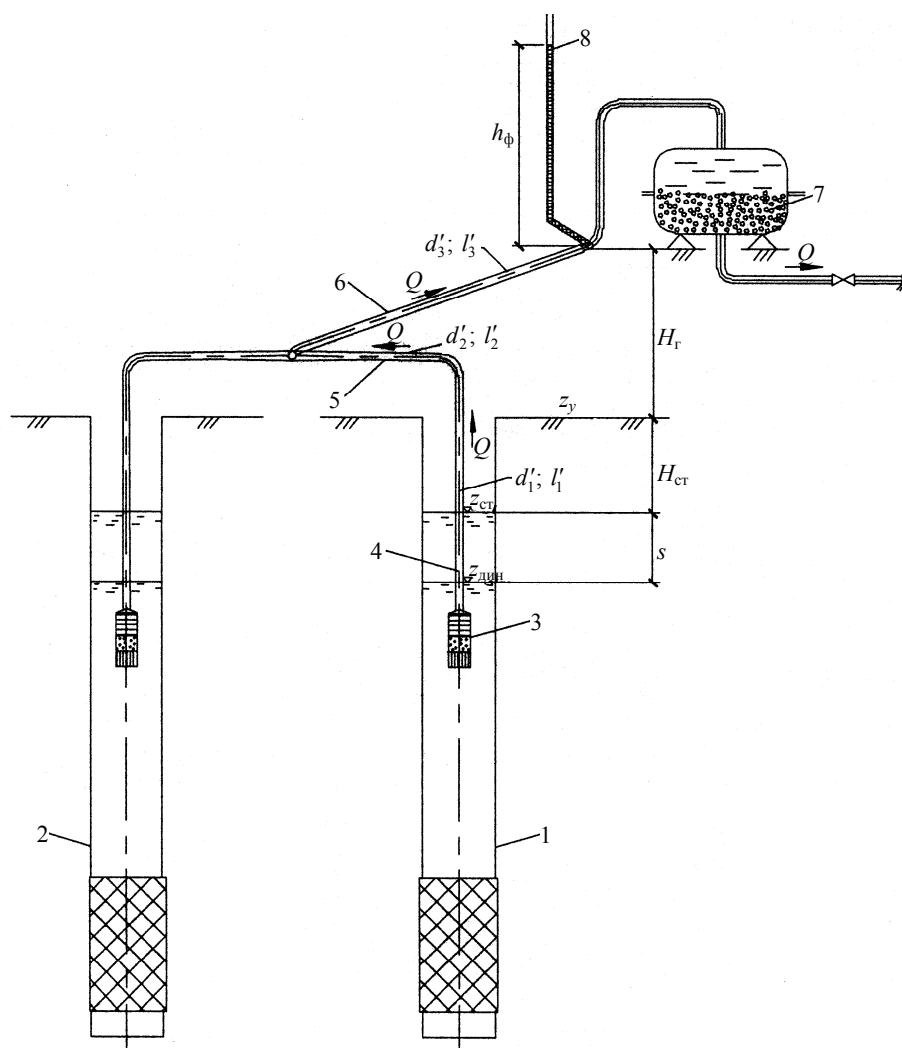


Рис. 1. Расчетная схема работы водозабора: 1 – основная скважина; 2 – резервная скважина; 3 – рабочий насос основной скважины; 4 – водоподъемная труба; 5 – линия подключения к сборному водоводу; 6 – сборный водовод; 7 – напорный фильтр станции водоподготовки; 8 – пьезометр; z_y , $z_{ст}$, $z_{дин}$ – отметка соответственно устья скважины, статического и динамического уровня воды

Fig. 1. The design scheme of the pumps in the main and reserve wells: 1 – the main well; 2 – the reserve well; 3 – the working pump of the main well; 4 – the water lifting pipe; 5 – the connection line to the collecting water pipe; 6 – the collecting water pipe; 7 – the pressure filter of the water treatment station; 8 – the piezometer; z_y , $z_{ст}$, $z_{дин}$ – wellhead elevation, static and dynamic water level

Приравняв характеристику (1) и выражение (2), получим уравнение для определения подачи насоса Q

$$-aQ^2 + bQ + c = H_r + H_{ст} + \frac{Q}{q} + A_1 l_1 Q^2 + A_2 l_2 Q^2 + A_3 l_3 Q^2 + \zeta_{\phi} Q^2. \quad (3)$$

Уравнение (3) можно применить для расчета двухколонных скважин. Водозабор, состоящий из двух двухколонных скважин, представлен на рис. 2.

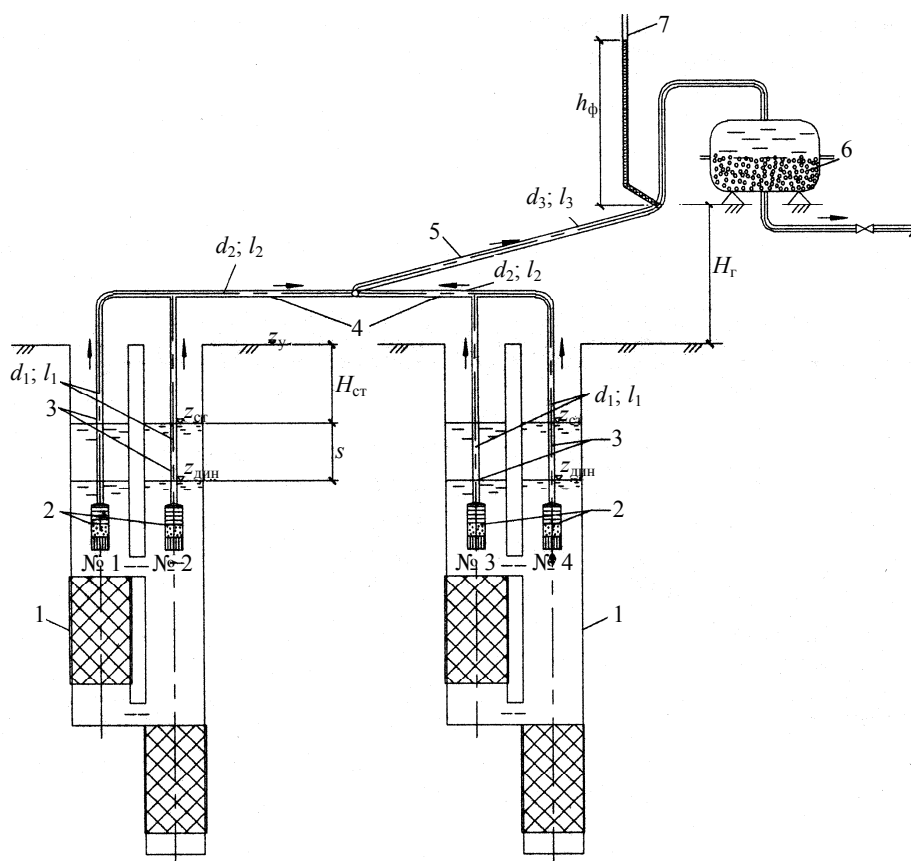


Рис. 2. Расчетная схема работы насосов в двухколонных скважинах:

- 1 – двухколонная скважина; 2 – насос двухколонной скважины; 3 – водоподъемная труба;
4 – линия подключения к сборному водоводу; 5 – сборный водовод;
6 – напорный фильтр станции водоподготовки; 7 – пьезометр

Fig. 2. Design scheme of pumps in working two-column wells: 1 – two-column wells;
2 – the pump of two-column wells; 3 – water lifting pipes; 4 – the connection line to the
collecting water pipe; 5 – the collecting water pipe; 6 – the pressure filter of the water
treatment plant; 7 – the piezometer

Проведем сравнительный анализ работы скважины, находящейся в составе водозабора из двух одноколонных скважин (рис. 1), и двух двухколонных скважин (рис. 2), подающих воду на напорный фильтр станции водоподготовки. Рассмотрим различные варианты функционирования насосов.

Исходные данные – годовой график водопотребления и водоподачи (табл. 1).

Расчетная схема 1 (рис. 1): $H_{ст} = 10$ м; $H_{г} = 10$ м; $q = 2$ м³/ч = 0,5555 л/с. Характеристики трубопроводов: водоподъемные трубы: $l'_1 = 50$ м, внутренний диаметр $d'_1 = 125$ мм ($A_1 = 0,00007636$); линия подключения к сборному водоводу: $l'_2 = 100$ м, внутренний диаметр $d'_2 = 125$ мм ($A_2 = 0,00007636$); сборный водовод: $l'_3 = 100$ м, внутренний диаметр $d'_3 = 150$ мм ($A_3 = 0,00003065$);

коэффициент сопротивления напорного фильтра станции водоподготовки $\zeta_{\text{ф}} = 0,0245$ [11, 12]. Рабочий насос в скважине ЭЦВ 10-65-65 НРК.

Таблица 1

График водопотребления и водоподачи
Water consumption and water supply schedule

Нагрузка	Годовое количество часов эксплуатации насосов t , ч/год	Подача насосов Q , м ³ /ч	Объем водопотребления W , м ³
Полная	396	62,40	24700
Частичная	818	39,10	32000
Основная	2976	20,16	60000
Итого ежегодное водопотребление			116700

Расчетная схема 2 (рис. 2): $H_{\text{ст}} = 10$ м; $H_{\text{г}} = 10$ м; $q = 2$ м²/ч = 0,5555 л/с. Характеристики трубопроводов: водоподъемные трубы: $l_3 = 35$ м, внутренний диаметр $d_1 = 75$ мм ($A_1 = 0,0009294$); линия подключения к сборному водоводу: $l_3 = 100$ м, внутренний диаметр $d_2 = 100$ мм ($A_2 = 0,0001729$); сборный водовод: $l_3 = 100$ м, внутренний диаметр $d_3 = 150$ мм ($A_3 = 0,00003065$); коэффициент сопротивления напорного фильтра станции водоподготовки $\zeta_{\text{ф}} = 0,0245$ [11, 12]. Рабочий насос в каждом стволе двухколонной скважины (№ 1–4) ЭЦВ 6-16-50 КН.

Вариант 1. Работает один насос ЭЦВ 10-65-65 НРК в основной скважине (рис. 1). Уравнение (1) для определения напора насоса будет иметь вид

$$H_{\text{н}} = H_{\text{г}} + H_{\text{ст}} + \frac{Q}{q} + A_1 l_1' Q^2 + A_2 l_2' Q^2 + A_3 l_3' Q^2 + \zeta_{\text{ф}} Q^2.$$

Рабочая характеристика насоса ЭЦВ 10-65-65 НРК, установленного в основной скважине:

$$H_{\text{н}} = -0,0809Q^2 + 0,8486Q + 74,424.$$

Тогда уравнение (3) запишем

$$\begin{aligned} -0,0809Q^2 + 0,8486Q + 74,424 = 10 + 10 + \frac{Q}{0,5555} + 0,00007636 \cdot 50Q^2 + \\ + 0,00007636 \cdot 100Q^2 + 0,00003065 \cdot 100Q^2 + 0,0245Q^2. \end{aligned}$$

Решая квадратное уравнение, найдем подачу насоса $Q = 17,7$ л/с = 63,7 м³/ч. Следовательно, напор насоса $H_{\text{н}} = -0,0809 \cdot 17,7^2 + 0,8486 \cdot 17,7 + 74,424 = 64,1$ м.

Подберем двигатель ДАП 8-20 (КПД $\eta_{\text{дв}} = 83$ %) к насосу ЭЦВ 10-65-65 НРК (КПД $\eta_{\text{н}} = 49$ %). Гидравлическую энергию $N_{\text{н}}$, передаваемую насосом жидкости, рассчитаем по формуле [13]

$$N_n = \rho g Q H_n, \quad (4)$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²,

$$N_n = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,0177 \cdot 64,1 = 11130 \text{ Вт.}$$

Электрическую мощность N_n , необходимую для поддержания работы системы, найдем по выражению

$$N_n = \frac{N_n}{\eta_n \eta_{дв}} = \frac{11130}{0,49 \cdot 0,83} = 27366 \text{ Вт.} \quad (5)$$

Количество часов эксплуатации насоса t в год

$$t = \frac{W}{Q} = \frac{116700}{63,7} = 1832 \text{ ч,} \quad (6)$$

где W – объем водопотребления, м³.

Потребляемая в течение года электроэнергия

$$P_{\text{год}} = N_n t = 27366 \cdot 1832 = 50135 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (7)$$

Удельный расход электроэнергии

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{год}}}{W} = \frac{50135}{116700} = 0,43 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3. \quad (8)$$

Вариант 2. Работают четыре насоса ЭЦВ 6-16-50 КН (№ 1–4) в двух двухколонных скважинах (рис. 2). Поддачи всех насосов примем одинаковыми и равными Q_1 . Составим систему уравнений для двухколонных скважин для определения подачи насоса:

$$\begin{cases} H_n^1 = H_r + H_{ст} + \frac{Q_1}{q} + \frac{Q_1}{q} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 (2Q_1)^2 + A_3 l_3 (4Q_1)^2 + \zeta_{\Phi} (4Q_1)^2; \\ H_n^2 = H_r + H_{ст} + \frac{Q_1}{q} + \frac{Q_1}{q} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 (2Q_1)^2 + A_3 l_3 (4Q_1)^2 + \zeta_{\Phi} (4Q_1)^2. \end{cases}$$

Рабочая характеристика насосов ЭЦВ 6-16-50 КН, установленных в двухколонных скважинах:

$$H_n = -1,2217Q_1^2 + 1,5074Q_1 + 62,38. \quad (9)$$

Для определения подачи любого из насосов составим уравнение

$$-1,2217Q_1^2 + 1,5074Q_1 + 62,38 = 10 + 10 + \frac{Q_1}{0,5555} + \frac{Q_1}{0,5555} + 0,00007636 \cdot 50Q_1^2 + \\ + 0,00007636 \cdot 100(2Q_1)^2 + 0,00003065 \cdot 100(4Q_1)^2 + 0,0245(4Q_1)^2.$$

Подача одного насоса $Q_1 = 4,34$ л/с = $15,6$ м³/ч, четырех – $62,4$ м³/ч. Напор насоса $H_n = -1,2217 \cdot 4,34^2 + 1,5074 \cdot 4,34 + 62,38 = 45,9$ м.

Подберем двигатель ПЭДВ 4-144 ($\eta_{дв} = 78\%$) к насосу ЭЦВ 6-16-50 КН ($\eta_{дв} = 47,9\%$). Далее расчеты по зависимостям (4)–(8) сведем в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов потребляемой электроэнергии для варианта 2

Results of calculations of consumed electricity for option 2

Гидравлическая энергия, передаваемая насосом жидкости, N_n , Вт	Электрическая мощность, необходимая для поддержания работы системы, N_n , Вт	Объем водопотребления W , м ³	Количество часов эксплуатации насоса в год t , ч	Электроэнергия, потребляемая в течение года, $P_{год}$, кВт·ч	Удельный расход электроэнергии $P_{уд}$, кВт·ч/м ³
7818	20924	24700	396	8286	0,335

Вариант 3. Работают два насоса ЭЦВ 6-16-50 КН (№ 1, 3), по одному в каждой из двухколонных скважин (рис. 2). Составим систему уравнений для определения подачи Q_1 :

$$\begin{cases} H_n^1 = H_r + H_{ст} + \frac{Q_1}{q} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 Q_1^2 + A_3 l_3 (2Q_1)^2 + \zeta_{\phi} (2Q_1)^2; \\ H_n^2 = H_r + H_{ст} + \frac{Q_1}{q} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 Q_1^2 + A_3 l_3 (2Q_1)^2 + \zeta_{\phi} (2Q_1)^2. \end{cases} \quad (10)$$

Уравняем характеристику (9) и систему (10):

$$-1,2217Q_1^2 + 1,5074Q_1 + 62,38 = 10 + 10 + \frac{Q_1}{0,5555} + 0,00007636 \cdot 50Q_1^2 + \\ + 0,00007636 \cdot 100Q_1^2 + 0,00003065 \cdot 100(2Q_1)^2 + 0,0245(2Q_1)^2.$$

Подача одного насоса $Q_1 = 5,43$ л/с = $19,55$ м³/ч, двух – $39,1$ м³/ч. Напор насоса $H_n = -1,2217 \cdot 5,43^2 + 1,5074 \cdot 5,43 + 62,38 = 34,5$ м.

Подберем двигатель ПЭДВ 4-144 ($\eta_{дв} = 78\%$) к насосу ЭЦВ 6-16-50 КН ($\eta_n = 44\%$). Расчеты по (4)–(8) сведем в табл. 3.

Вариант 4. Работает один насос ЭЦВ 6-16-50 КН (№ 1) в двухколонной скважине (рис. 2). Найдем напор насоса

$$H_n^1 = H_r + H_{ст} + \frac{Q_1}{q} + A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 Q_1^2 + A_3 l_3 Q_1^2 + \zeta_{\phi} Q_1^2. \quad (11)$$

Таблица 3

Результаты расчетов потребляемой электроэнергии для варианта 3

Results of calculations of consumed electricity for option 3

Гидравлическая энергия, передаваемая насосом жидкости, N_n , Вт	Электрическая мощность, необходимая для поддержания работы системы, N_n , Вт	Объем водопотребления W , м ³	Количество часов эксплуатации насоса в год t , ч	Электроэнергия, потребляемая в течение года, $P_{\text{год}}$, кВт·ч	Удельный расход электроэнергии $P_{\text{уд}}$, кВт·ч/м ³
3680	10972	32000	818	8979	0,281

Для определения подачи уравняем характеристику (9) и выражение (11):

$$-1,2217Q_1^2 + 1,5074Q_1 + 62,38 = 10 + 10 + \frac{Q_1}{0,5555} + 0,00007636 \cdot 50Q_1^2 + 0,00007636 \cdot 100Q_1^2 + 0,00003065 \cdot 100Q_1^2 + 0,0245Q_1^2.$$

Тогда подача насоса $Q_1 = 5,6$ л/с = 20,16 м³/ч. Напор насоса $H_n = -1,2217 \cdot 5,6^2 + 1,5074 \cdot 5,6 + 62,38 = 32,51$ м.

Подбираем двигатель ПЭДВ 4-144 ($\eta_{\text{дв}} = 78$ %) к насосу ЭЦВ 6-16-50 КН ($\eta_n = 42$ %). Расчеты по (4)–(8) сведем в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов потребляемой электроэнергии для варианта 4

Results of calculations of consumed electricity for option 4

Гидравлическая энергия, передаваемая насосом жидкости, N_n , Вт	Электрическая мощность, необходимая для поддержания работы системы, N_n , Вт	Объем водопотребления W , м ³	Количество часов эксплуатации насоса в год t , ч	Электроэнергия, потребляемая в течение года, $P_{\text{год}}$, кВт·ч	Удельный расход электроэнергии $P_{\text{уд}}$, кВт·ч/м ³
1786	5471	60000	2976	16224	0,27

Согласно проведенным расчетам, величина потребляемой в течение года электроэнергии при параллельной работе насосов в водозаборе, состоящем из двухколонных скважин, в периоды пиковой, основной и частичной нагрузок (варианты 2–4) $P_{\text{год}}^{2-4} = 8286 + 8979 + 16224 = 33489$ кВт·ч.

В сравнении с величиной электроэнергии, потребляемой в течение года при работе одного насоса в водозаборе, состоящем из двух скважин (основной и резервной), в периоды пиковой, основной и частичной нагрузок (вариант 1), экономия составит:

$$\Delta P = P_{\text{год}}^1 - P_{\text{год}}^{2-4} = 50135 - 33489 = 16648 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\frac{\Delta P}{P_{\text{год}}^1} 100 \% = \frac{16648}{50135} 100 = 33,2 \ \%.$$

ВЫВОДЫ

1. В одноколонной скважине, в которой в течение незначительного времени возникают резкие снижения динамического уровня воды, появление отложений в пазах труб фильтров и гравийной засыпки вероятнее, чем в скважине, которая длительный период имела равномерную нагрузку. Отложения в трубах фильтра снижают производительность скважины и сокращают интервалы между регенерациями.

2. При заборе воды из двухколонной скважины частоту возникновения резких снижений уровня можно значительно сократить, например установив в первой колонне насос для основной нагрузки, а во второй – насос, рассчитанный на пиковые нагрузки. При заборе воды из нескольких двухколонных скважин насосы следует комбинировать таким образом, чтобы обеспечивать потребный расход с минимальным падением уровня грунтовых вод, минимальными потерями на трение в системе трубопроводов и при минимальном давлении в фильтре. При каскадном включении параллельно работающих насосов можно увеличить период между текущим сервисным обслуживанием скважины и повысить качество очистки воды.

3. Проведен сравнительный анализ работы одной скважины, находящейся в составе водозабора из двух одноколонных скважин (рабочей и резервной), и двух двухколонных рабочих скважин, подающих воду на напорный фильтр станции водоподготовки. В результате расчетов установлено, что при комбинировании работы насосов в периоды пиковой, основной и частичной нагрузок годовая экономия электроэнергии составит 33 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верременюк, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Верременюк, 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>.
2. 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>.
3. Тугай, А. М. Водоснабжение из подземных источников / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. Киев: Урожай, 1990. 264 с.
4. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
5. Тугай, А. М. Продуктивность водозаборных скважин в условиях кольматажа: монография / А. М. Тугай, О. Я. Олейник, Я. А. Тугай; ХНАНХ. Харьков, 2004. 240 с.
6. Алексеев, В. С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В. С. Алексеев, В. Т. Гребенников. М.: Агропромиздат, 1987. 239 с.
7. Милихикер, А. Г. Осадкообразование в скважинах водопонижения / А. Г. Милихикер. М.: Энергия, 1971. 104 с.
8. Скважинные насосы. Техническое пособие [Электронный ресурс] / Grundfos. Режим доступа: https://www.pump-selection.ru/files/FilesGrundfos/books/6SP_1205.pdf. Дата доступа: 04.07.2022.

9. Основы расчета и проектирования двухколонных двухфилтровых водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 5. С. 410–419. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-410-419>.
10. Водозаборная скважина: пат. Респ. Беларусь 23608 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. Оpubл. 30.12.2021.
11. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. 11-е изд., доп. М.: Бастет, 2016. 428 с.
12. Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия: ГОСТ 3262–75. Введ. 01.01.1977. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. 12 с.
13. Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем: ГОСТ 33969–2016. Введ. 01.03.2019. Москва: Стандартинформ, 2017. 45 с.

Поступила 22.03.2022 Подписана в печать 30.05.2022 Опубликовано онлайн 30.09.2022

REFERENCES

1. Veremenyuk V. V., Ivashechkin 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).
2. Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I., Anufriev V. N., Avrutin O. A. (2021) Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286> (in Russian).
3. Tugai A. M., Prokopchuk I. T. (1990). *Water Supply from Underground Sources*. Kyiv, Urozhai Publ. 264 (in Russian).
4. Plotnikov N. A., Alekseev V. S. (1990) *Design and Operation of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 256 (in Russian).
5. Tugai A. M., Oleinik O. Ya., Tugai Ya. A. (2004) *Productivity of Water Intake Wells in Conditions of Colmatage*. Kharkiv, 240 (in Russian).
6. Alekseev V. S., Grebennikov V. T. (1987) *Restoring the Flow Rate of Water Intake Wells*. Moscow, Agropromizdat Publ. 239 (in Russian).
7. Milikhiker A. G. (1971) *Sedimentation in Water Reduction Wells*. Moscow, Energiya Publ. 104 (in Russian).
8. Grundfos. *Borehole Pumps. Technical Manual*. Available at: https://www.pump-selection.ru/files/FilesGrundfos/books/6SP_1205.pdf (Accessed 4 July 2022) (in Russian).
9. Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A., Kondratovich A. N., Satsuta E. S. (2021) Basics of Calculation and Design of Two-Column Two-Filter Water Intake Wells. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 20 (5), 410–419. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-410-419> (in Russian).
10. Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A. (2021) *Water Intake Well*. Patent of Republic of Belarus No 23608 (in Russian).
11. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) *Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes*. 11th ed. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).
12. State Standard 3262-75. *Steel Water and Gas Pipes. Technical specifications*. Moscow, IPK Publishing House of Standards, 1997. 12 (in Russian).
13. State standard 33969-2016. *Energy Efficiency. Evaluation of the Energy Efficiency of Pumping Systems*. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 45 (in Russian).

Received: 22 March 2022

Accepted: 30 May 2022

Published online: 30 September 2022