

УДК 628.112.24:69.003.13

Жизненный цикл погружных центробежных насосов в водозаборных скважинах

В. Н. ФИСЕНКО*

* Фисенко Вячеслав Николаевич, кандидат технических наук, R&D директор, частная научная инновационная компания «Ru Well Systems»
214530, Россия, Смоленская область, село Печерск, Школьная ул., 10, офис 18, тел.: (920) 310-98-28,
e-mail: well-systems@rambler.ru

Длительность жизненного цикла (энергоэффективного и рабочего) погружного насоса в водозаборной скважине определяется как характеристиками вскрываемого водоносного горизонта и достигнутыми при строительстве качественными параметрами вскрытия водоносного пласта, так и показателями технического уровня и качества применяемого погружного насоса в части энергосбережения – запасом напора $SP_{(0,75)}$ в энергоэффективном и $SP_{(0,7)}$ в рабочем диапазонах расходно-напорной характеристики насоса. Более полное использование жизненного цикла (энергоэффективного и рабочего) погружного насоса в скважине возможно с помощью дополнительных технических средств контроля и регулирования в скважине и на поверхности, а продление цикла – использованием более совершенного энергоэффективного насосного оборудования, разработки которого слабо стимулируются государством, либо про-

ведением ремонтно-восстановительных мероприятий на скважине или искусственным пополнением запасов подземных вод. Показатели технического уровня и качества продукции, заложенные производителем на этапе разработки и проектирования конструкции самого насоса, определяют запас напора на расходно-напорной характеристике насоса в энергоэффективном и рабочем диапазонах, влияют на длительность жизненного цикла погружного насоса в скважине, а следовательно, определяют структуру и величину возможных издержек потребителя насосной продукции и себестоимость поднимаемой воды.

Ключевые слова: погружной центробежный многоступенчатый насос, жизненный цикл насоса, водозаборная скважина, удельный дебит, запас напора в энергоэффективном диапазоне.

Нормативная база

Погружные многоступенчатые центробежные электронасосы находят широкое применение в буровых скважинах на воду для нужд промышленного и коммунального водоснабжения, орошения сельскохозяйственных угодий, в осушительных системах добычи полезных ископаемых и строительного водопонижения, а также в продуктивных скважинах добычи полезных ископаемых методами физико-химической геотехнологии.

Меры государственного стимулирования производства насосного оборудования высокой энергетической эффективности (производи-

тельностью 38–180 м³/ч, КПД не ниже 61–69% в зависимости от подачи), предусмотренные Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2015 г. № 600 «Об утверждении перечня объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности», включают предоставление налоговых льгот и преференций производителям такого оборудования.

Изменения нормативно-правовой базы (ГОСТ 33969-2016 «Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем») на территории Евразийского экономического сообщества направлены на использование единообразного, в соответствии с междуна-

родными документами (ISO/ASME 14414:2015), подхода к требованиям по эксплуатации насосного оборудования исходя из энергоэффективности и энергосбережения, а также к инспекции водозаборов и формированию отчетов о результатах оценки текущего энергопотребления насосных систем.

Целью таких обследований (инспекций) является оценка текущего энергопотребления насосной системы и определение путей повышения ее эффективности. Одно из существенных требований – возможность проверки сторонними аудиторами, включая органы, наделенные контрольно-ревизионными функциями, *показателей, определенных в отчетах* по энергоэффективности насосных систем, и *фактического выполнения* намеченных мероприятий.

Применительно к скважинным водозаборам с погружными центробежными насосами принята нормативная база предъявляет такие же требования эксплуатации насосного оборудования в энергоэффективном диапазоне подач и напоров.

В странах Европейского союза проведены специальные исследования [1] насосного оборудования, результаты которых последовательно нашли отражение в нормативных документах, где определен рекомендуемый размер энергоэффективного диапазона параметров для производителей всех типов насосов, соответствующий $0,75Q_0$ и $1,1Q_0$ (Q_0 – номинальная подача насоса, соответствующая точке максимального КПД). Работа насосного оборудования за пределами указанного диапазона считается работой на нерасчетных режимах, хотя и допустимой в пределах рабочей зоны, определяемой производителем. Стандартами также утверждены индексы минимальных допустимых КПД для погружных насосов, перекачивающих воду, – не ниже 0,7 (рис. 1).

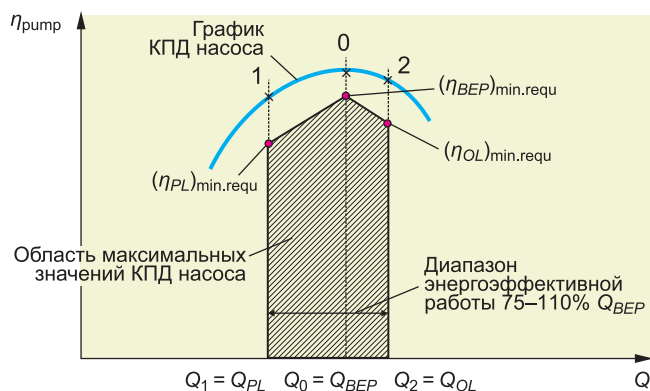


Рис. 1. Рекомендованный энергоэффективный диапазон параметров для производителей и потребителей насосов в ЕС

В США принят закон об энергосбережении насосного оборудования, где в качестве критерия эффективности утвержден так называемый энергетический индекс насоса. К продаже на территории США допускаются насосы, средняя потребляемая мощность которых ниже аналитически определяемой, законодательно установленной величины. Такие значения индекса насоса применяются в качестве энергетического критерия.

В Китае умело копируют лучшие образцы насосного оборудования европейских производителей и производят более дешевые аналоги под собственными брендами. Перед применением таких насосов желательно проводить параметрические испытания, подтверждающие заявленные характеристики.

В настоящее время в профессиональном сообществе производителей насосов обсуждаются подходы к выработке критериев эффективности для системы «насос – двигатель – сеть» с учетом профиля изменения нагрузки и способа регулирования (управления). Следует отметить, что подобные исследования для различных схем водоподъема из скважин проводились еще в Советском Союзе [2–5] при координации ВНИИ ВОДГЕО и Госстроя СССР.

Рост энергопотребления водозабора [6] существенно влияет на увеличение операционных издержек и себестоимость потребляемых водных ресурсов, поэтому практический интерес для оператора услуг водоснабжения (потребителя водных ресурсов) представляет оценка возможного роста энергопотребления водозабора. Многие производители насосного оборудования и потребители проводят расчеты по методике анализа стоимости жизненного цикла LCC (Life Cycle Cost) в варианте методики Института гидравлики США, позволяющей оценить затраты на проект в течение всего срока жизни оборудования.

Наиболее сложным и спорным моментом при применении указанной методики к погружным насосам скважинных водозаборов является выбор значений параметров – длительности жизненного цикла насоса и ставки дисконтирования.

Жизненный цикл насоса одни автор принимают равным гарантийному сроку (2 года), другие ссылаются на срок службы, заявленный производителем (10 лет). В документах бухгалтерского учета основных средств на предприятиях в РФ погружные насосы определяются как имущество со сроком полезного использования свыше 2 лет до 3 лет включительно. Ранее, в советской практике расчетов экономической эффективности

нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений E_n составлял от 0,12 до 0,17, что соответствовало сроку службы $T_n = 6-8$ лет. В дальнейшем будем рассматривать длительность цикла полезного использования насоса в скважине по своему прямому назначению, так как длительность этого цикла зависит от условий работы конкретного насоса в конкретной скважине.

В ряде расчетов ЛСС ставка дисконтирования принимается исходя из различных вариантов ставок из сферы банковского менеджмента: от ставки рефинансирования до ключевой и других вариаций кредитных предложений. То есть, с одной стороны, используется подход портфельного инвестора, основывающийся на возможности альтернативных инвестиций, но при этом почему-то не учитывается, что для предприятий ВКХ источником капитальных вложений в оборудование могут служить либо средства федерального или региональных бюджетов, либо собственные средства предприятия ВКХ.

Соответствующая доходность источника финансовых ресурсов при покупке насосного оборудования скважинных водозаборов должна использоваться при назначении ставки дисконтирования. Так, для собственных средств предприятий ВКХ могут иметь место усредненные региональные значения доходности ведения бизнеса в сфере водоснабжения, водоочистки и водоотведения, поскольку именно доходность бизнеса создает денежный поток, на который может рассчитывать покупатель, отвлекая собственные денежные средства на покупку именно этого оборудования. Не исключено, что ставка в некоторых случаях может быть и отрицательной из-за политики государственного регулирования тарифов на воду и различий в финансовой обеспеченности регионов России. **Определение ставки дисконтирования, основывающееся на показателях рентабельности предприятий ВКХ, ждет своего решения в рамках Российской ассоциации водоснабжения и водоотведения.**

Как правило, многими авторами при использовании методики ЛСС принимается одна расчетная подача насоса на весь срок службы (например, номинальная), и исходя из этого допущения производится расчет всех производных эксплуатационных параметров. Тогда как в оригинале текста методики ЛСС имеется прямое указание: «Рабочая точка насоса определяется пересечением системной кривой и кривой насоса. Пользователь насоса должен тщательно рассмотреть продолжительность работы в отдельных точках службы должным образом».

В связи с этим в дальнейшем необходимо узнать, какова длительность работы погружного насоса в скважине исходя из технологических параметров, заявленных производителем, и характеристик вскрываемого водоносного пласта с учетом требований энергоэффективности.

Расчет показателей

Практика эксплуатации скважинных водозаборов подземных вод свидетельствует о том, что реальные дебиты скважин после начала эксплуатации отличаются от проектных. Это происходит как в результате допущенных дефектов при строительстве и недоучета при проектировании факторов, влияющих на режим работы водозабора, так и в результате естественных процессов физико-химической коррозии [6] и обрастания фильтровой и обсадной колонн и различного вида кольматаций при фильтровой зоне скважины [7].

С точки зрения производителя насосного оборудования эксплуатация погружного многоступенчатого центробежного электронасоса в скважине по условиям функционирования — это откачка жидкости из природной системы с устойчивым во времени глобальным трендом снижения напора на входе в насос (роста удельного потребления электроэнергии на единицу поднимаемой жидкости) в результате уменьшения притока жидкости в водоприемную полость скважины и кратковременными периодически знакопеременными флуктуациями напора на входе (вследствие колебаний уровня грунтовых вод) и выходе (изменение противодавления сети) под действием внешних техногенных и природных факторов.

Таким образом, рабочая точка совместной работы насоса и системы водоподъема смещается глобально влево от начального значения по напорно-расходной характеристике насоса. При этом наблюдаются периодические флуктуации рабочей точки вправо-влево по характеристике в зависимости от колебания напора грунтовых вод в зоне всасывания насоса и колебания противодавления в зоне нагнетания насоса.

На рис. 2 показано (для общего случая) начальное (0) и конечное (1) положение рабочей точки насоса и системы водоподъема на расходно-напорной характеристике $Q-H$ насоса. Участок $\{Q_0; nQ_0\}$ характеристики $Q-H$ насоса (при $n = 0,7$) можно рассматривать как **рабочий диапазон насоса в скважине**. Длительность нахождения рабочей точки в указанном диапазоне соответствует **рабочему жизненному циклу погружного насоса в скважине**. Крайнее правое положение ра-

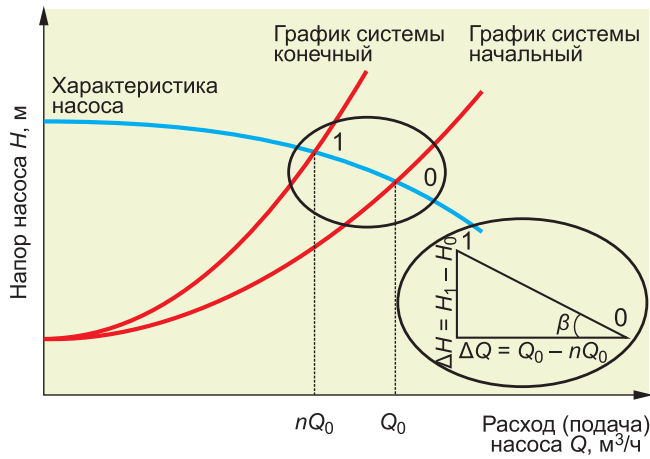


Рис. 2. Положение рабочей точки (0 – начальное, 1 – конечное) насоса и системы водоподъема на расходно-напорной $Q-H$ -характеристике в течение периода работы насоса в скважине

бочей точки Q_0 соответствует, как правило, номинальному расходу насоса в точке максимального КПД (точке перегиба графика $Q-\eta$ насоса), либо находится правее от точки номинального расхода и определяется как подача насоса в начале эксплуатации. Крайнее левое положение рабочей точки nQ_0 определяется, как правило, производителем насосного оборудования, в зависимости от конструктивных особенностей конкретного насоса, как конец рабочей зоны насоса.

Работу насоса в энергоэффективном ($n = 0,75$) диапазоне $0,75Q_0$ и Q_0 можно определить как **энергоэффективный цикл работы погружного насоса в скважине**. Длительность нахождения рабочей точки в указанном диапазоне соответствует продолжительности энергоэффективного цикла насоса в скважине.

Работа насосов на нерасчетных режимах (за пределами указанных выше диапазонов) является одним из существенных факторов, объясняющих расхождение между задекларированным производителем сроком эксплуатации насоса (как правило, 10 лет) и фактическим (от нескольких месяцев до 2–6 лет). Такая работа зачастую завершается поломкой, отказом или прекращением эксплуатации насоса. Другим существенным фактором, определяющим продолжительность жизненного цикла насоса в скважине, являются разные **показатели технического уровня и качества продукции**, заложенные производителем на этапе разработки и проектирования конструкции самого насоса, его отдельных узлов и элементов, ввиду чего насосы разных производителей имеют различную продолжительность эксплуатации в однотипных скважинах.

Для получения ответа на вопрос о длительности эксплуатации насоса в скважине были

проведены расчеты на основании известных методик [8; 9] с использованием следующего подхода. Рассмотрена работа скважинного водозабора с погружным центробежным насосом при естественной сработке запасов подземных вод (без подпитки и перетока). В начале эксплуатации скважины при установившемся движении фильтрационного потока (откачка с расходом Q_0) стабилизовавшееся понижение уровня в скважине составляет:

$$t = 0 \rightarrow S_0, \tag{1}$$

где t – длительность эксплуатации скважины; S_0 – начальное понижение уровня в скважине.

Через некоторое время эксплуатации t_1 наблюдается рост гидравлических потерь в фильтре и прифильтровой зоне скважины, что приводит к дополнительному понижению уровня во внутренней полости скважины на величину ΔS и снижению удельного дебита. Понижение уровня в скважине составит:

$$t = t_1 \rightarrow S_1(t) = S_0 + \Delta S; \tag{2}$$

$$Q_1(t) = nQ_0. \tag{3}$$

Для оценки параметров кольматажа на практике анализируют данные об изменении во времени удельных дебитов водозаборных скважин. Расчетные зависимости в этом случае основываются на решениях, описывающих изменение коэффициента фильтрации пород во времени. Для случая неравновесного массообмена в зоне кольматации [7; 8]:

$$k(t) = k_{\phi} [1 - N_0/n_0(1 - e^{-tC_0\gamma})]^3,$$

что позволяет в общем случае получить для большой группы скважин (с положительным начальным показателем скин-эффекта) приближенную формулу **динамики удельного дебита во времени**¹ в зависимости от параметров интенсивности протекания кольматационных процессов:

$$q_1(t) \approx q_0 e^{-t^3 C_0 \gamma}. \tag{4}$$

Учитывая, что $q_1 = Q_1/S_1$, $q_0 = Q_0/S_0$ и подставив в формулу (4) зависимости (2) и (3), получим:

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{S_0}{Q_0} + \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta S}{Q_0} = \frac{S_0}{Q_0} e^{t^3 C_0 \gamma}. \tag{5}$$

¹ Для обеспечения выполнения Федерального закона от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ потребители (организации ВКХ, водоканалы и пр.) должны контролировать и определять зависимость темпа снижения удельного дебита во времени для эксплуатируемых скважин.

Запас напора в произвольном диапазоне работы насоса $[nQ_0; Q_0]$ определяется [9] по расходно-напорной характеристике конкретного скважинного насоса из соотношения значений расхода Q_1, Q_0 и напора H_1, H_0 на границах (рис. 1) указанного диапазона соответственно:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{H_1 - H_0}{Q_0 - Q_1} = \frac{\Delta H}{Q_0 - nQ_0} = \frac{1}{1-n} \cdot \frac{\Delta H}{Q_0}. \quad (6)$$

Полагая, что в некоторый момент времени t_1 величина ΔS может достичь и превысить запас напора ΔH , соответствующий энергоэффективному $[0,75Q_0; Q_0]$ либо рабочему $[0,7Q_0; Q_0]$ диапазону работы насоса, и исходя из равенства $\Delta S = \Delta H$ с учетом выражений (6) и (1), преобразуем формулу (5) в выражение, связывающее параметры расходно-напорной характеристики и КПД скважинного насоса с параметрами скважины – параметрами интенсивности протекания кольматационных процессов в прифилтровой зоне скважины:

$$t_1 = \frac{\ln \left[\frac{1}{n} + \left(\frac{1-n}{n} \right) q_0 \operatorname{tg}\beta \right]}{3C_0\gamma}, \quad (7)$$

где n – параметр, определяющий долю от номинального расхода Q_0 для крайней левой границы энергоэффективного ($n = 0,75$), либо рабочего ($n = 0,7$) диапазона работы погружного насоса; $\operatorname{tg}\beta$ – коэффициент, характеризующий скорость роста напора на расходно-напорной характеристике скважинного насоса в минимальном энергоэффективном $[0,75Q_0; Q_0]$, либо в минимальном рабочем $[0,7Q_0; Q_0]$, либо в произвольном $[nQ_0; Q_0]$ диапазонах; q_0 – удельный дебит в начале эксплуатационного цикла насоса, связывающий водоотдачу пласта, сопротивление водоносного пласта и сопротивление, которое обусловлено несовершенством скважины по степени и характеру вскрытия пласта в начале эксплуатационного цикла насоса, л/с; $C_0\gamma$ – параметр, характеризующий скорость протекания кольматационных процессов в прифилтровой зоне скважины (C_0 – концентрация в откачиваемой воде кольматирующих соединений; γ – скорость выпадения кольматанта из воды и осадения его в зоне кольматации).

Для минимального энергоэффективного $[0,75Q_0; Q_0]$ диапазона работы насоса формула (7) приобретает вид:

$$t_1 = \frac{\ln(4 + q_0 \operatorname{tg}\beta) - 1,0986}{3C_0\gamma}. \quad (8)$$

Для минимального рабочего $[0,7Q_0; Q_0]$ диапазона работы насоса формула (7) приобретает вид:

$$t_1 = \frac{\ln(10 + 3q_0 \operatorname{tg}\beta) - 1,9459}{3C_0\gamma}. \quad (9)$$

Таким образом, из расчета по выражению (8) следует: если рабочая точка насоса и системы в момент времени $t > t_1$ выходит из энергоэффективного диапазона, то промежуток времени $[0; t_1]$ можно считать **длительностью энергоэффективного цикла жизни погружного насоса в скважине**².

В качестве примера на рис. 3 приведена диаграмма, рассчитанная по формуле (8), по оценке длительности **энергоэффективного цикла жизни насоса в скважине** (в сопоставимых условиях) однотипных конструкций скважинных погружных насосов различных производителей, представляющих свою продукцию на российском рынке.

Если работа насоса продолжается и дальше, до момента, когда рабочая точка насоса и системы в момент времени $t = t_2$ выходит из **рабочего диапазона**, то промежуток времени $[0; t_2]$ можно считать для выражения (9) **длительностью рабочего цикла жизни погружного насоса в скважине**.

В качестве примера на рис. 4 приведена диаграмма, рассчитанная по формуле (9), по оценке длительности **рабочего цикла жизни в скважине** однотипных конструкций скважинных погружных насосов тех же производителей.

В таблице характеристик насосов [10] приведены значения показателя **SP – запаса напора в энергоэффективном диапазоне** ($SP = \operatorname{tg}\beta - \text{stock pressure on energy efficiency range}$) [9], рассчитанные для однотипных насосов различных производителей на основании сведений рекламных информационных каталогов и программ подбора насосного оборудования производителей.

Анализ данных, приведенных на рис. 3, 4 и в таблице [10], свидетельствует о том, что показатели технического уровня и качества продукции, заложенные производителем на этапе разработки и проектирования конструкции насоса, его отдельных узлов и элементов, определяющие скорость роста напора ($\operatorname{tg}\beta$) на расходно-напор-

² Промежуток времени соответствует темпу снижения удельного дебита скважины до значения на границе энергоэффективного диапазона насоса и глобальному выходу рабочей точки из этого диапазона (не связан с кратковременными флуктуациями рабочей точки по выходу из энергоэффективного диапазона).

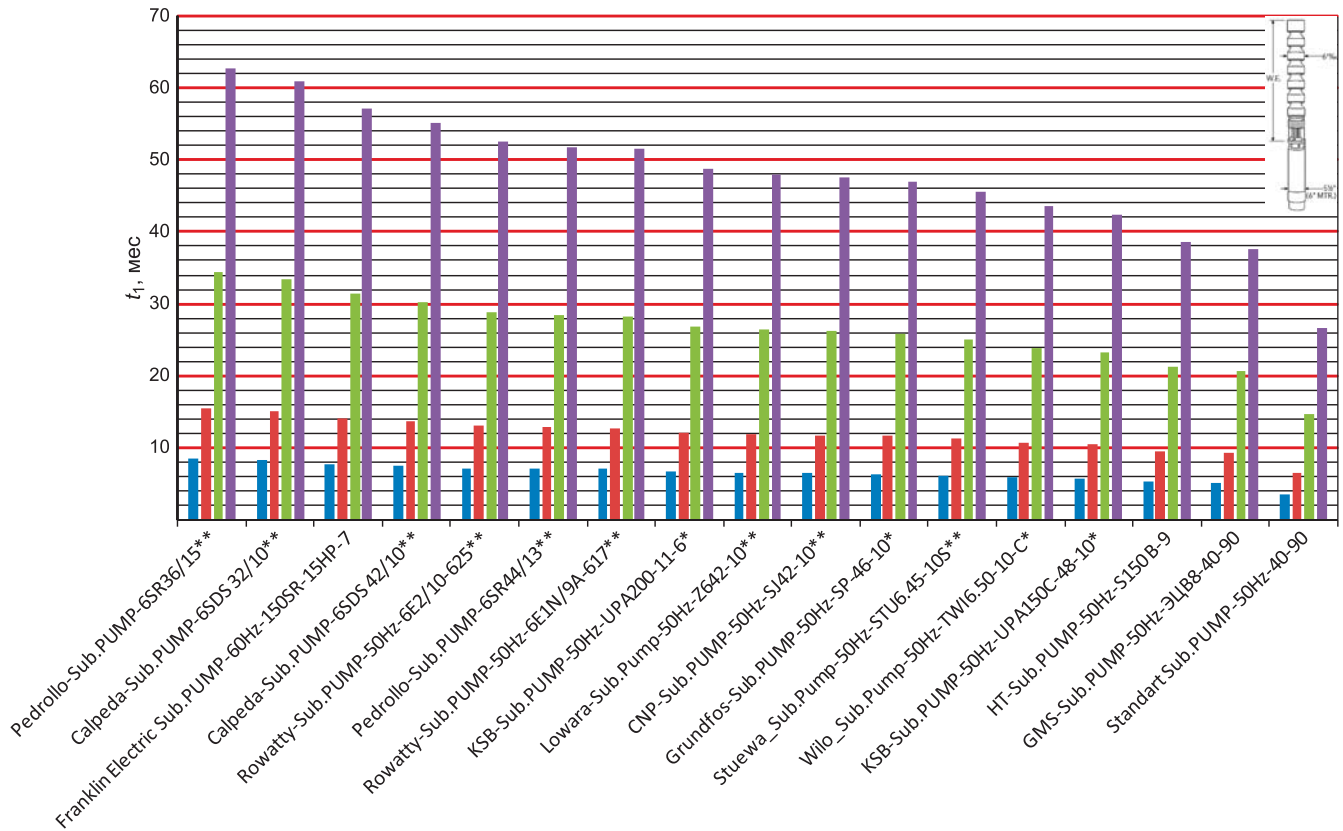


Рис. 3. Длительность энергоэффективного жизненного цикла погружного насоса в скважине
 ■ минимальная; ■ средняя; ■ типичная; ■ максимальная; марки погружных насосов 6" и 8" для водозабора 30–50 м³/ч с глубины 80–100 м

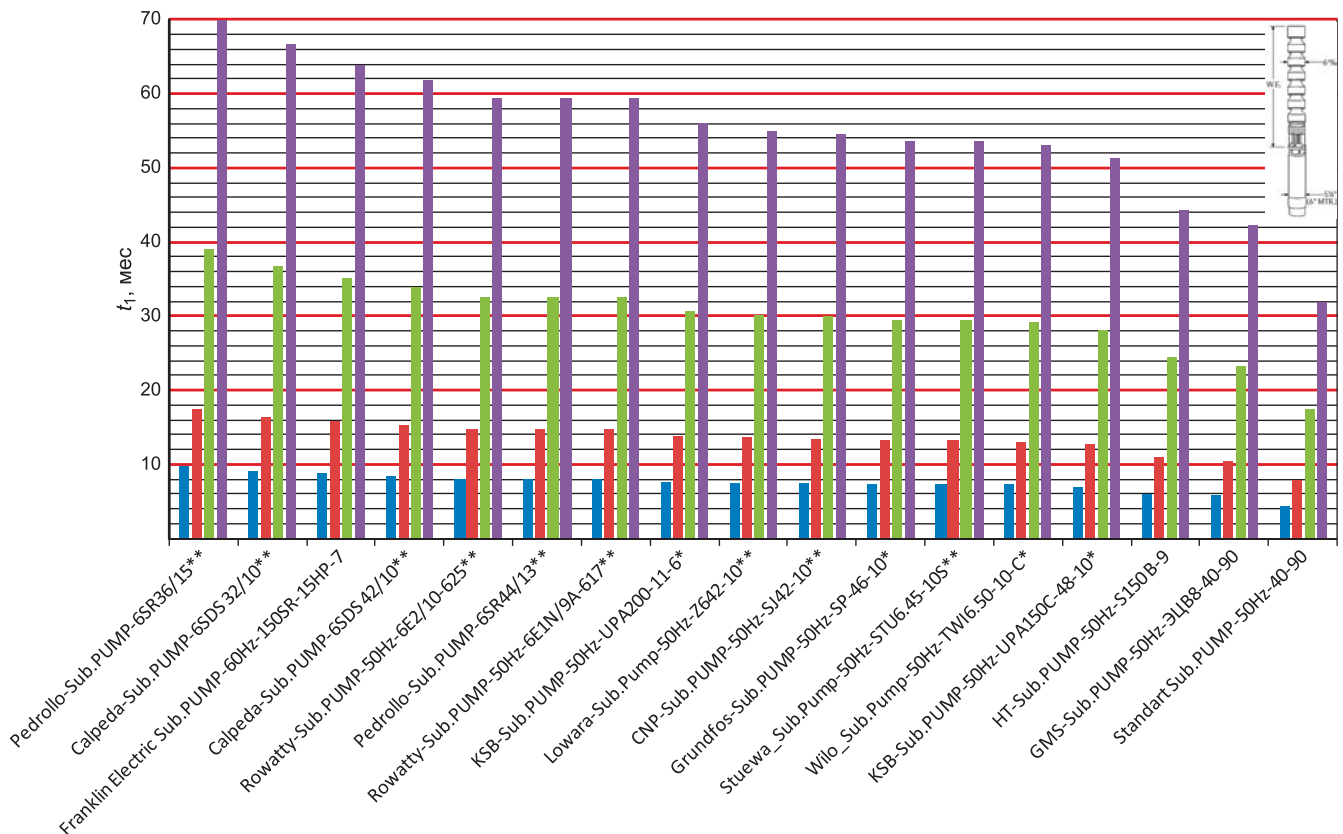


Рис. 4. Длительность рабочего жизненного цикла погружного насоса в скважине
 ■ минимальная; ■ средняя; ■ типичная; ■ максимальная; марки погружных насосов 6" и 8" для водозабора 30–50 м³/ч с глубины 80–100 м

ной характеристике насоса, крутизну в энергоэффективном и рабочем диапазонах, влияют на длительность жизненного цикла погружного насоса в скважине, а следовательно, определяют структуру и величину возможных издержек потребителя насосной продукции.

Обсуждение результатов

Длительность жизненного цикла. Для корректности сравнения использовались однотипные насосы различных производителей с подачей $\sim 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором 90–100 м. Дополнительный критерий отличия – крутизна расходно-напорной характеристики насосов 9–32% по стандартной классификации [11]: «напорная характеристика характеризуется крутизной, которая определяется соотношением $(H_{\max} - H_{\text{опт}})/H_{\text{опт}}$ в рабочей части характеристики насоса».

Скважинные насосы с крутопадающими характеристиками имеют для потребителя большую привлекательность с позиций энергосбережения и снижения издержек. Для наиболее типичных условий [8] падения дебита скважин ($C_{0\gamma} = 0,01533 \text{ мес}^{-1}$, $q_0 = 3,78 \text{ л/с}$) вычисленная по формуле (8) **длительность энергоэффективного цикла насоса** с $SP = 2,83$ (Pedrollo-Sub.PUMP-6SR36/15) составляет 34,58 месяца, тогда как для насоса с $SP = 1$ (GMS-Sub.PUMP-50Hz-ЭЦВ8-40-90) – всего 20,7 месяца, а наименее экономичный насос с $SP = 0,5$ (потенциально возможный вариант) проработал бы в скважине не более 14,67 месяца.

Соответственно, для наиболее типичных условий [8] падения дебита ($C_{0\gamma} = 0,01533 \text{ мес}^{-1}$, $q_0 = 3,78 \text{ л/с}$) вычисленная по формуле (9) **длительность рабочего цикла насоса** с $SP = 2,83$ (Pedrollo-Sub.PUMP-6SR36/15) составляет 39,04 месяца, тогда как для насоса с $SP = 1$ (GMS-Sub.PUMP-50Hz-ЭЦВ8-40-90) – всего 23,26 месяца, а наименее экономичный насос с $SP = 0,5$ (потенциально возможный вариант) проработал бы в скважине не более 17,53 месяца.

Энергоэффективный жизненный цикл насосов с крутопадающими ($\text{tg}\beta = 2,833$) Q – H -характеристиками в 1,67 раза, а рабочий цикл – в 1,68 раза превышают по длительности соответствующие циклы насосов с пологими ($\text{tg}\beta = 1$) Q – H -характеристиками. После истечения периода времени, определенного как длина энергоэффективного Pump $LCL_{\text{се}}$ либо рабочего жизненного цикла насоса в скважине Pump LCL_{work} , эксплуатирующей организации необходимо принимать решение о возможности его дальнейшего использования: менять на новый, менее производительный; консервировать

и помещать на хранение; проводить на скважине ремонтно-восстановительные мероприятия и использовать повторно. Первые два варианта более распространены на практике и характеризуют экономически затратный подход в менеджменте ВКХ.

Длительность жизненного цикла насоса Grundfos-Sub.PUMP-50Hz-SP-46-10 в скважине 10 лет требует, чтобы параметр «старения скважины» $3C_{0\gamma}$ был не более $0,0093 \text{ мес}^{-1}$, что находится за пределами известного интервала значений этого показателя для скважин, определенных исследованиями [7; 8; 12].

Показатели технического уровня и качества насосной продукции в части энергетической эффективности

Насосный блок. В сравнении использовался насос ЭЦВ8-40-90 отечественного производства (Группа ГМС), предпоследний в списке таблицы, крутизна расходно-напорной характеристики одна из низких – 11%. Примечательно, что и новый насос CIRIS(CRS8-40/6) этого же производителя, заявленный как изделие высокой энергетической эффективности, имеет такие же параметры по крутизне характеристики, как насос ЭЦВ8-40-90. Исходя из приведенных выше расчетов, оба насоса имеют одинаковую длительность цикла работы в скважине (рис. 3, 4), если не применяются дополнительные технические средства контроля и регулирования подачи и напора.

Экономически оправдано применение таких насосов с пологими характеристиками на водозаборах с искусственным пополнением запасов подземных вод (ИППВ) [7], где короткий цикл работы насоса компенсируется режимом поддержания необходимого динамического уровня в скважине системой ИППВ.

Показатель $SP_{(0,75)}$ в энергоэффективном и $SP_{(0,7)}$ в рабочем диапазонах расходно-напорной характеристики насоса может использоваться в системе оценки органами государственного управления показателей высокой энергетической эффективности для производителей как отечественного, так и локализованного насосного оборудования при рассмотрении мер стимулирования выпуска насосного, контрольно-измерительного и регулирующего оборудования.

Электродвигатель. Скважинные насосы с пологими характеристиками проектировались из условия обеспечения экономичности при регулировании подачи насоса дросселированием, т. е. обеспечением требуемого расхода за счет

регулирования задвижкой. В настоящее время данный способ регулирования признан энергозатратным, поэтому получает распространение частотное регулирование — изменение частоты вращения электродвигателя погружного насоса при помощи специализированного энергетического оборудования. Так же применяются и более дорогие синхронные погружные электродвигатели.

Момент вращения при пуске синхронного погружного электродвигателя пропорционален первой степени напряжения электрического тока. При этом происходит плавный пуск насоса, более благоприятный для запуска скважины, так как градиент давления плавно нарастает в фильтре скважины.

Момент вращения при пуске асинхронного погружного электродвигателя пропорционален второй степени напряжения электрического тока. При этом происходит резкий толчок с затухающим колебательным процессом при включении — пуск насоса, неблагоприятный для запуска скважины, так как резко знакопеременно изменяется градиент давления в фильтре скважины. Поэтому необходимо управлять пуском насоса [13] в зависимости от скорости изменения давления на входе в него. Исследования пусковых режимов скважинных насосов и устройств плавного запуска скважин проводились А. Д. Гуриновичем еще в 1974 г. во ВНИИ ВОДГЕО и отражены в трудах института.

Применение насоса с пологой характеристикой дополнительно усугубляет процесс пуска насоса с асинхронным погружным электродвигателем в скважине, увеличивая амплитуду колебаний градиента давления в фильтре, что приводит к суффозионному выносу частиц из верхней части фильтра и нарушению его гравийной обсыпки. Это особенно сильно проявляется в скважинах [4] с большим понижением уровня, так как в начальный момент рабочая точка насоса и системы находится значительно правее по характеристике, т. е. запуск производится с первоначально большей подачей, чем у аналогичного насоса с более крутой характеристикой.

Контрольно-измерительное оборудование. Очевидным и необходимым требованием к контрольно-измерительному оборудованию, применяемому для комплектации насосов, является **наличие средств оперативного технического контроля и регулирования положения рабочей точки насоса и системы водоподъема в оптимальном рабочем диапазоне** и регистрация периодов функционирования насоса на нерасчетных режимах за пределами указанного диапазона.

Опыт разработки и применения подобных средств контроля уже имеется (для консольных насосов) у производителей насосных систем и оборудования (таких как *Pump Meter* [14] от концерна *KSB*, Германия) с системами автоматического регулирования частоты вращения электродвигателя насоса. Дополнительно необходимым методом контроля является **измерение давления (разрежения) на входе в насос и учет запаса напора, соответствующего как рабочему, так и энергоэффективному диапазону.**

Требования к предоставлению информации производителями. По параметру *запас напора* в энергоэффективном $SP_{(0,75)}$ и $SP_{(0,7)}$ рабочем диапазонах производители должны вносить сведения в рекламно-информационные каталоги насосного оборудования. Варианты такого представления показателей скважинного погружного насоса производителем насосного оборудования и методы их определения и подтверждения приведены в [10; 15].

Выводы

1. Длительность жизненного цикла (энергоэффективного и рабочего) погружного насоса в водозаборной скважине определяется как характеристиками вскрываемого водоносного горизонта и достигнутыми при строительстве качественными параметрами вскрытия водоносного пласта, так и показателями технического уровня и качества применяемого скважинного насоса в части энергосбережения — запасом напора $SP_{(0,75)}$ в энергоэффективном и $SP_{(0,7)}$ в рабочем диапазонах расходно-напорной характеристики насоса.
2. Контроль жизненного цикла (энергоэффективного и рабочего) погружного насоса в скважине возможен с помощью дополнительных технических средств контроля (давления, перепада давления на входе в насос) как непосредственно в скважине, так и на поверхности (расход подаваемой воды, потребление электроэнергии, давление на устье), хронометрируемых в периоды включения-выключения насоса.
3. Продление жизненного цикла (энергоэффективного и рабочего) погружного насоса в скважине возможно с помощью более совершенного энергоэффективного насосного оборудования, разработки которого слабо стимулируются государством, либо проведением ремонтно-восстановительных мероприятий на скважине или искусственного пополнения запасов подземных вод.
4. Организационно-технические и финансовые возможности потребителей (пользователей

насосного оборудования) серьезно отстают от темпов нормативно-правового регулирования в сфере энергосбережения и энергоэффективности и требуют принятия соответствующих мер органами государственного контроля и управления для устранения дисбаланса и обеспечения потребителей необходимой продукцией.

5. Система оценки органами государственного управления показателей высокой энергетической эффективности [1] для производителей как отечественного, так и локализованного насосного оборудования не учитывает требования практики эксплуатации скважинных водозаборов и не стимулирует производителей для выпуска насосного, контрольно-измерительного и регулирующего оборудования.

6. Потребители насосного оборудования при принятии решения о возможности закупки скважинного насоса того или иного производителя должны соизмерять возможные варианты собственных издержек: капитальные вложения на покупку самого насоса и операционные расходы на обслуживание и электроэнергию в течение длительности жизненного цикла насоса в конкретной скважине (конкретных гидрогеологических условиях) во избежание неоправданных переплат за бренд, рекламу и другие, не имеющие экономического смысла, опции, навязываемые производителями.

7. Регулятором тарифов на услуги водоснабжения не уделяется должного внимания выработке экономических параметров хозяйственной деятельности в отрасли и доступному информированию о них участников хозяйственной деятельности с целью обеспечения возможности элементарного проведения корректных расчетов закупки технологического оборудования и планирования инвестиционных мероприятий на перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stoffel B., et al. Assessing the energy efficiency of pumps and pump units: background and methodology. Elsevier Science, 2015. 295 p. <http://cds.cern.ch/record/2115837> (дата обращения 16.12.2016).
2. Фисенко В. Н. Гидравлическая оптимизация и оборудование водоподъема из скважин с беструбной установкой погружных электронасосов: Дисс. ... канд. техн. наук. – М., ВНИИ ВОДГЕО, 1991. 139 с.
3. Трусов М. М., Фисенко В. Н. Комплектное оборудование для беструбного водоподъема из скважин и опыт его применения / Сооружение и эксплуатация водозаборов подземных вод: Под редакцией Алексева В. С. – М.: Издательство Центрального российского дома знаний, 1991. С. 25–33.
4. Фисенко В. Н. Критерии оптимизации режима эксплуатации водозаборной вакуум-скважины / Вклад молодых ученых и специалистов в ускорение научно-технического прогресса. – Джембул, 1988.
5. А. с. 1491974, СССР. Способ подготовки водозаборной скважины к эксплуатации / Фисенко В. Н., Фисенко Н. Т. // Бюллетень изобретений. 1989. № 25.
6. Фисенко В. Н. Энергосбережение при эксплуатации скважинных водозаборов подземных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 11. С. 22–33.
7. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84) / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
8. Плотников Н. А., Алексеев В. С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. – М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
9. Фисенко В. Н. О нормативном сроке службы погружных многоступенчатых центробежных электронасосов в скважинах: Международная научно-техническая конференция «ECOPUMP-RUS'2016 «Энергоэффективность и инновации в насосостроении. Импортзамещение и локализация производства в России». 26 октября 2016 г., Москва. – М.: Издательство МВЦ «Крокус Экспо», 2016. С. 48–61.
10. Фисенко В. Н. Оценка технического уровня погружного насоса при проведении инспекции энергоэффективности скважинного водозабора по ГОСТ 33969-2016 (ISO/ASME 14414) // Вода Magazine. 2017. № 5. С. 24–29.
11. Лопастные насосы: Справочник / Под общей редакцией Зимницкого В. А. – Л.: Машиностроение, 1986. 334 с.
12. Шейко А. М., Ивашечкин В. В., Гуринович А. Д., Галицкий В. А. Прогноз кольматажа скважин и определение рациональных сроков их регенерации / Вестник БГТУ. – Минск: Издательство Белорусского государственного технического университета, 2006.
13. А. с. 1439288, СССР. Способ управления насосом на переходных режимах / Фисенко В. Н., Фисенко Н. Т. // Бюллетень изобретений. 1988. № 43.
14. PumpMeter by KSB – reliable pump monitoring helps increase efficiency. <https://www.ksb.com/ksb-en/About-KSB/Research/Automation/PumpMeter/> (дата обращения 16.12.2016).
15. Фисенко В. Н. Влияние технического уровня погружного насоса на энергоэффективность скважинного водозабора: Сборник докладов XII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковлева. – М., Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. С. 204–209.

Life cycle of submerged centrifugal pumps in groundwater wells

V. N. FISENKO*

* Fisenko Viacheslav Nikolaevich, Ph. D. (Engineering), R&D Director, «Ru Well Systems» Private Research Innovation Company Office 18, 10 Shkol'naia St., 214530, Pechersk Village, Smolensk Area, Russian Federation, tel.: +7 (920) 310-98-28, e-mail: well-systems@rambler.ru

The duration of a life cycle (energy efficient and operation) of a submerged pump in a groundwater well is determined by the characteristics of a tapped underground reservoir and the quality parameters obtained during underground reservoir tapping as well as by the technical characteristics and production quality of the submerged pump used related to the energy efficiency – $SP_{(0,75)}$ margin head in the energy efficient range and $SP_{(0,7)}$ in the operation range of the pump head-capacity curve. Making better use of the life cycle (energy efficient and operational) of a submerged pump in a well is possible with the help of additional technical control means in the well and on the surface; whereas the elongation of the life cycle is possible by using more advanced energy efficient pumping equipment, developments in the field weakly enhanced by the state, or by carrying out maintenance and repair in the well, or by artificial making up the underground water resources. The indicators of engineering level and product quality established by the manufacturer at the pump design stage that determine the margin head on the pump head-capacity curve, in the energy efficient and operational ranges effect the duration of the life cycle of a submerged pump in a well, and hence determine the structure and value of the possible expenditures of a pumping equipment user and the unit cost of the abstracted water.

Key words: submerged centrifugal multi-stage pump, pump life cycle, groundwater well, specific yield, margin head in the energy-efficient range.

REFERENCES

1. Stoffel B., et al. Assessing the energy efficiency of pumps and pump units: background and methodology. Elsevier Science, 2015, 295 p. <http://cds.cern.ch/record/2115837> (accessed 16.12.2016).
2. Fisenko V. N. *Gidravlicheskaia optimizatsiia i oborudovanie vodopod'ema iz skvazhin s bestrubnoi ustanovkoi pogruzhnykh elektromosov* [Hydraulic optimization and water abstraction from wells with tubeless installation of submerged electric pumps. Ph. D. thesis in Engineering Science. Moscow, VNII VODGEO, 1991, 139 p.].
3. Trusov M. M., Fisenko V. N. *Komplektnoe oborudovanie dlia bestrubnogo vodopod'ema iz skvazhin i opyt ego primeniia. Sooruzhenie i ekspluatatsiia vodozaborov podzemnykh vod* [Complete set of equipment for tubeless water abstraction from wells and the experience of use. Construction and operation of underground water intakes. Under the editorship of Alekseev V. S. Moscow, Izdatel'stvo Tsentral'nogo rossiiskogo doma znanii Publ., 1991, pp. 25–33].
4. Fisenko V. N. *Kriterii optimizatsii rezhima ekspluatatsii vodozabornoi vakuum-skvazhiny. Vklad molodykh uchenykh i spetsialistov v uskorenie nauchno-tekhnicheskogo progressa* [Criteria of optimizing the operating mode of a vacuum groundwater well. Contribution of young research workers and professionals to the acceleration of the scientific-technical progress. Dzhambul, 1988].
5. Fisenko V. N., Fisenko N. T. [Method of preparing a groundwater well for operation]. Inventor's Certificate 1491974, USSR. *Bulleten' Izobretenii*, 1989, no. 25. (In Russian).
6. Fisenko V. N. [Energy saving in operating deep wells for underground water abstraction]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2016, no. 11, pp. 22–33. (In Russian).
7. *Posobie po proektirovaniu sooruzhenii dlia zabora podzemnykh vod (k SNiP 2.04.02-84) VNII VODGEO Gosstroia SSSR* [Textbook on designing facilities for underground water abstraction (to SNiP 2.04.02-84). VNIIVODGEO of USSR Gosstroii. Moscow, Stroizdat Publ., 1989, 272 p.].
8. Plotnikov N. A., Alekseev V. S. *Proektirovanie i ekspluatatsiia vodozaborov podzemnykh vod* [Designing and operating underground water intakes. Moscow, Stroizdat Publ., 1990, 256 p.].
9. Fisenko V. N. [On the standard service life of submersible multi-stage centrifugal electric pumps in wells]. «ECOPUMP-RUS'2016 «Energy efficiency and innovations in pump manufacturing. Import substitution and production localization in Russia» International Scientific and Technical Conference. October 26, 2016, Moscow, MVTS «Krokus-Ekspo» Publ., 2016, pp. 48–61. (In Russian).
10. Fisenko V. N. [Assessment of the technical level of a submersible pump in the process of inspecting the energy efficiency of a groundwater deep well by GOST 33969-2016 (ISO/ASME 14414)]. *Voda Magazine*, 2017, no. 5, pp. 24–29. (In Russian).
11. *Lopastnye nasosy* [Impeller pumps. Reference book. Under the editorship of Zimnitskii V. A. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 334 p.].
12. Sheiko A. M., Ivashechkin V. V., Gurinovich A. D., Galitskii V. A. [Prediction of well mudding and determination of useful life of their regeneration]. *Vestnik BGTU*, Minsk, Izdatel'stvo Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta Publ., 2006. (In Russian).
13. Fisenko V. N., Fisenko N. T. [Inventor's Certificate 1439288, USSR. Method of operating pumps under transient conditions]. *Bulleten' Izobretenii*, 1988, no. 43. (In Russian).
14. PumpMeter by KSB – reliable pump monitoring helps increase efficiency. <https://www.ksb.com/ksb-en/About-KSB/Research/Automation/PumpMeter/> (accessed on 16.12.2016).
15. Fisenko V. N. [Effect of the technical level of a submersible pump on the energy efficiency of a deep well]. Book of reports of XII International Scientific-Technical Conference dedicated to the memory of S. V. Iakovlev, RAS Academician. Moscow, Natsional'nyi issledovatel'skii Moskovskii gosudarstvennyi stroitel'nyi universitet Publ., 2017, pp. 204–209.