

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ СИСТЕМ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

В. Н. Ануфриев¹, В. В. Ивашечкин², О. А. Аврутин³, Г. А. Волкова⁴, В. И. Крицкая⁵

¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Водоснабжение и водоотведение» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь; e-mail : vladimir.anufriev@rambler.ru

² Д. т. н., профессор, декан факультета энергетического строительства Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь; e-mail : ivashechkin@bntu.by

³ Директор УП «Минскводоканал», Минск, Беларусь; e-mail : OA@minskvodokanal.by

⁴ К. т. н., доцент, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь; e-mail : volga-brest@mail.ru

⁵ Ассистент кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика» Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь; e-mail : vp93@mail.ru

Реферат

В статье приводится анализ данных, полученных в течение периода эксплуатации водозаборных скважин. При этом скважины водозабора рассматриваются как отдельные сооружения, эксплуатируемые в нестационарных внешних условиях, у которых изменяется подача, напор насосного агрегата, давление в точке подключения скважины к сборному трубопроводу. Предлагается производить оценку энергоэффективности насосных систем водозаборных скважин путем совместного анализа характеристик насосного агрегата и параметров водозаборной скважины, получаемых при статистической обработке данных ее эксплуатации за репрезентативный период.

Ключевые слова: водозаборная скважина, насосное оборудование, погружные насосы, потери напора, удельное энергопотребление.

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF PUMPING SYSTEMS OF WATER WELLS

V. N. Anufriyev, V. V. Ivashchkin, O. A. Avrutin, G. A. Volkova, V. I. Kritskaya

Abstract

The article provides an analysis of data obtained during the period of operation of water intake wells. In this case, water intake wells are considered as separate structures operated in non-stationary external conditions, which change the supply, head of the pump unit, and pressure at the point where the well is connected to the collection pipeline. It is proposed to assess the efficiency of pumping systems for water wells through joint analysis of the characteristics of the pump unit and parameters of wells obtained by aggregating the data of its operation for a representative period.

Keywords: water well, pump equipment, submersible pumps, head loss, specific power consumption.

Введение

Водоснабжение населенных пунктов в Республике Беларусь преимущественно обеспечивается забором вод из подземных водных источников. При этом водозаборы подземных вод являются потребителями электроэнергии, доля которых в общем балансе энергопотребления предприятий ВКХ составляет существенную величину. В связи с чем оптимизация режима работы водозаборов подземных вод со снижением удельного энергопотребления подачи воды является важной задачей для эксплуатирующих организаций.

Основная часть

При проектировании систем водоснабжения расчеты производительности водозаборных скважин традиционно производятся исходя из режима равномерной подачи воды в течение суток насосными станциями первого подъема. Исходя из этого же положения, подбираются насосные агрегаты. При этом реальный режим эксплуатации водозабора подземных вод может значительно отличаться. При включении водозаборной скважины в систему сборных водоводов водозабора на режим ее эксплуатации влияет ряд факторов. При этом параметры рассматриваемой скважины и смежных скважин водозабора постоянно изменяются во времени. Кроме того, при подаче воды непосредственно на напорные фильтры системы водоподготовки (обезжелезивания) на систему дополнительно воздействует переменное гидравлическое сопротивление фильтров, которое определяется периодичностью их промывок. На рисунке 1 показан график изменения давления на оголовке водозаборной скважины, подключенной к системе сборных водоводов. Как следует из рисунка 1, участки квазилинейного роста давления, обусловленного увеличением гидравлического сопротивления напорных фильтров станции обезжелезивания, сочетаются с участками, на которых про-

исходят резкие перепады давления, вызванные проведением промывок фильтров, а также включением или выключением других водозаборных скважин на водозаборе.

На указанные выше процессы краткосрочных изменений параметров скважин накладываются относительно долгосрочные изменения, такие как износ насосных агрегатов и увеличение гидравлического сопротивления притоку воды к фильтру вследствие кольматации фильтров и прифильтровых зон.

При оценке эффективности работы скважинного водозабора, в случае подключения нескольких скважин к тупиковому сборному водоводу, такая система может рассматриваться как параллельное включение насосных станций, работающих на один трубопровод. При кольцевой схеме сборных водоводов система усложняется, и для расчета такой системы используются математические зависимости для определения параметров кольцевых сетей с учетом характеристик скважин и показателей их взаимного влияния. Точный расчет параметров сборных водоводов и отдельных скважин в этом случае требует решения системы уравнений с большим количеством взаимозависимых переменных.

В качестве альтернативного способа оценки режима эксплуатации водозаборных скважин может использоваться способ определения параметров, получаемых при статистической обработке данных и стандартизированных подходов определения показателей энергоэффективности погружных скважинных насосных агрегатов, введенных в ТНПА. Данный способ может рассматриваться как частный случай проведения оценки энергоэффективности насосных систем по ГОСТ 33969 [1], с учетом нестационарности параметров эксплуатации скважин.



Рисунок 1 – График изменения давления на оголовке водозаборной скважины, подключенной к системе сборных водоводов

В соответствии с ГОСТ 33969 эксплуатационные характеристики насосов должны соответствовать параметрам нагрузки и гидравлического сопротивления трубопровода, при которых обеспечивается соответствие эксплуатационных параметров насосов характеристикам, декларируемым производителями. Наиболее эффективной является эксплуатация насоса в точке оптимального (максимального) КПД. Предпочтительной является работа в пределах диапазона высоких значений КПД, рабочего диапазона, указываемого производителем. Эксплуатация за пределами допустимого рабочего диапазона, указанного производителем насоса, является недопустимой.

Применительно к насосам водозаборных скважин такая оценка может производиться путем анализа данных, полученных в течение периода их эксплуатации, продолжительность которого достаточна для получения репрезентативного режима работы скважины. При этом скважины водозабора рассматриваются как отдельные сооружения, эксплуатируемые в нестационарных внешних условиях, у которых изменяется подача, напор насосного агрегата, давление в точке подключения скважины к сборному трубопроводу. Учитывая, что приведенные выше параметры для каждой скважины водозабора изменяются в определенных пределах, требуется установить диапазон таких изменений и распределение значений параметров в течение периода наблюдений. Далее, при использовании статистической обработки данных появляется возможность получить показатели для оценки энергоэффективности насосного оборудования скважин.

Так, при регистрации давления в отводящем трубопроводе на скважине и расхода воды в течение периода продолжительной работы скважины на сборный водовод появляется возможность получения зависимости указанных выше параметров друг от друга, а также зависимости их изменения во времени (в течение суток, дней недели).

По ГОСТ 33969 оценка энергоэффективности производится путем определения напоров, развиваемых скважинным насосом при соответствующих подачах, с последующим определением положения рабочей точки на характеристике насоса по отношению к рабочему диапазону и точке максимального КПД.

Измерение параметров погружных насосов при определении энергоэффективности имеет определенные отличия от проведения таких же работ, например на консольных центробежных насосах. При испытаниях консольных центробежных насосов, которые характеризуются как стандартный вариант их проведения, измерение давления производится на входе в насос и на выходе из него таким образом, чтобы точки измерения давления размещались как можно ближе к насосу (ГОСТ 6134 [2]). Погружные насосы невозможно испытывать по стандартной схеме из-за особенностей их монтажа. В связи с чем измерение давления производится манометром или другим измерительным прибором, установленным на оголовке скважины, с одновременными измерениями отметки динамического уровня в скважине и подачи, регистрацией расхода воды водомером на напорном трубопроводе. При этом напор, развиваемый скважинным насосным агрегатом, рассчитывается с учетом потерь напора в водоподъемных трубах и других компонентах скважины.

Работы по оценке энергоэффективности установленного в скважинах насосного оборудования производились на одном из водозаборов подземных вод г. Минска. Оценка энергоэффективности насосного оборудования, установленного в скважинах водозабора, производилась на основе положений ГОСТ 33969 с учетом особенностей подключения скважин и их оснащения контрольно-измерительными приборами. Учитывались и дополнительные гидравлические сопротивления, которые в случае эксплуатации погружных насосов в скважине являются существенными.

Подключение погружного насоса скважин водозабора к сборным водоводам, как правило, включает водоподъемные трубы, трубопроводы в павильоне скважины, на которых смонтированы запорная, предохранительная арматура, приборы контроля, а также участок трубопровода от павильона до сборного трубопровода.

Типичная схема оснащения водозаборной скважины приведена на рисунке 2. Датчики давления устанавливались: первый – «на оголовке» скважины перед запорно-регулирующей арматурой и водомером, второй – на «выходе», на трубопроводе после задвижки. Скважины также оснащались датчиками давления, размещенными в скважине ниже динамического уровня воды, а также дополнительно пневматическими уровнемерами для измерения статического и динамического уровней.

Исходя из схемы (рисунок 2), напор насосного агрегата может быть выражен уравнением (1) с учетом потерь напора между сечением 1-1 на входе в насос и сечением 2-2 (или 2'-2'), где проводилось измерение давления:

$$H_2 = z_{M2} - z_1 + \frac{P_{M2}}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + \sum h_{1-2}, \quad (1)$$

где z_{M2} – отметка размещения прибора для измерения давления (манометр, датчик давления) относительно уровня земли, м;

z_1 – отметка динамического уровня в скважине, м;

P_{M2} – манометрическое давление, отнесенное к центру поперечного сечения (давление, измеряемое манометром, на оголовке скважины), Па;

U_2 – средняя осевая скорость, м/с;

ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

h_{1-2} – потери напора между сечениями 1-1 и 2-2, м.

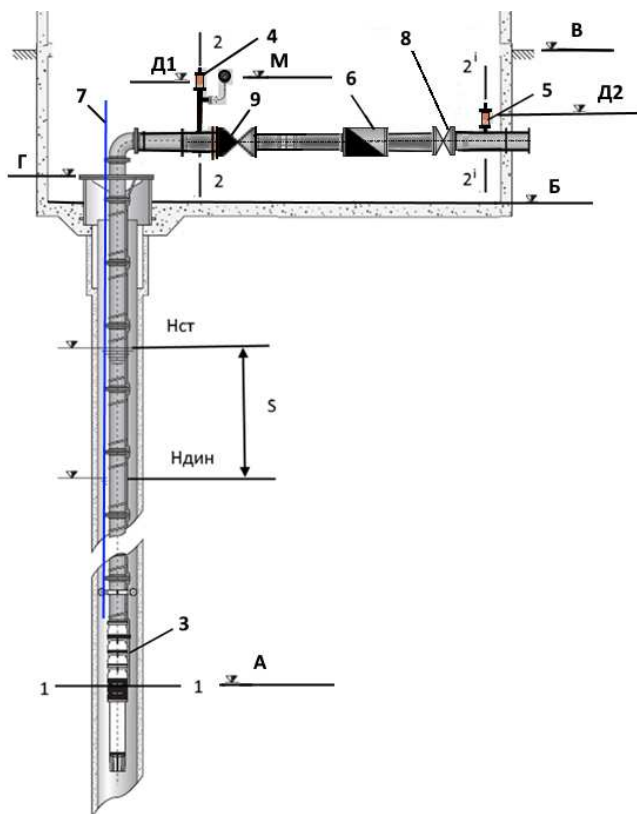
При установлении в качестве плоскости сравнения пола павильона или дна колодца размещения оголовка скважины, получим:

$$H_2 = L_{M2} + L_{z1} + \frac{P_{M2}}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + \sum h_{1-2}, \quad (2)$$

где L_{M2} – расстояние от плоскости сравнения (пол павильона) до плоскости размещения прибора для измерения давления (манометр, датчик потери напора), м;

L_{z1} – расстояние от плоскости сравнения (пол павильона) до динамического уровня в скважине, м.

Потери напора между сечениями 1-1 и 2-2 рассчитывались как сумма потерь напора по длине h_L , м, (водоподъемные трубы) и потерь напора на местные сопротивления h_M , м, по общепринятым зависимостям [3]. Для расчетов потерь напора в водоподъемных трубах использовались справочные данные гидравлических сопротивлений для труб, принимаемые с учетом скорости движения воды в них.



1-1 – условное расчетное сечение на входе в насос; 2-2 – условное расчетное сечение, перпендикулярное оси отводящего трубопровода в точке подключения датчика давления, установленного на устье скважины; 2'-2' – условное сечение, перпендикулярное оси отводящего трубопровода в точке подключения датчика давления, установленного на «выходе» скважины;

А – отметка уровня входа потока воды в погружной насос; Б – отметка пола павильона скважины; В – отметка поверхности земли у павильона скважины; Г – отметка опорной плиты оголовка устья скважины; Д1 – отметка уровня установки датчика давления, смонтированного на устье скважины; Д2 – отметка уровня установки датчика давления, смонтированного на «выходе» скважины; Нст – отметка статического уровня воды в скважине; Нд – отметка динамического уровня воды в скважине; М – отметка уровня установки манометра, смонтированного на устье скважины;

3 – погружной насосный агрегат; 4 – датчик давления, смонтированный на устье скважины; 5 – датчик давления, смонтированный на «выходе» скважины; 6 – водомер; 7 – пневматический уровнемер; 8 – задвижка; 9 – обратный клапан; s – понижение

Рисунок 2 – Типичная схема оснащения водозаборной скважины насосным агрегатом, запорно-регулирующей арматурой, приборами контроля

Для оценки использовались данные подачи, регистрируемые водомером, и давления, регистрируемые датчиками через час.

Подача измерялась стационарно установленными турбинными счетчиками марки COSMOS Sensus WPDDN 100 и DN 150 метрологического класса "В" с погрешностью не более $\pm 2\%$, а также портативным ультразвуковым расходомером-счетчиком «Взлет ПР» (УРСВ).

Пределы допускаемой относительной погрешности расходомера-счетчика «Взлет ПР» при измерении, индикации, регистрации, хранении и передаче результатов измерения среднего расхода, объема при любом направлении потока не превышают значений, определяемых по формуле:

$$\delta = \pm \left(1,2 + \frac{0,2}{v} \right), \quad (3)$$

где δ – пределы допускаемой относительной погрешности расходомера, %;

v – текущая скорость потока в трубопроводе, м/с.

При скоростях потока воды в отводящем трубопроводе скважины 1,0-2,0 м/с, пределы допускаемой относительной погрешности расходомера оцениваются интервалом 1,3–1,4 %.

Давление измерялось преобразователем давления ОВЕН ПД100 - ДИ -1,6-11-1,0, предназначенным для непрерывного преобразования измеряемого давления (абсолютного, избыточного, гидростатического, дифференциального, разрежения) в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 4–20 мА и (или) цифровой сигнал интерфейсов HART или RS-485. Пределы измеряемого давления 0–1,6 МПа, предельное давление перегрузки 2,0 МПа. Предел допустимой основной погрешности измерения: $\pm 1,0\%$.

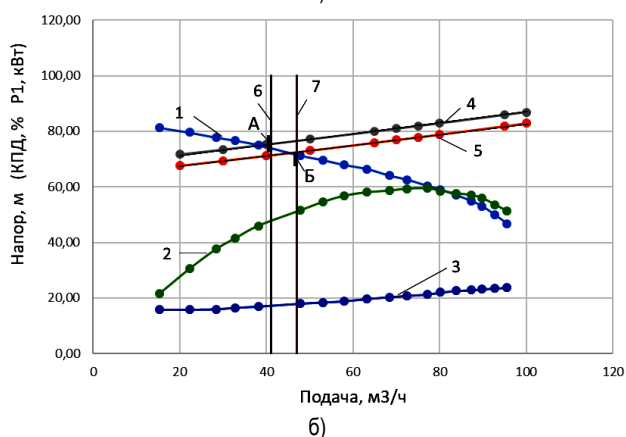
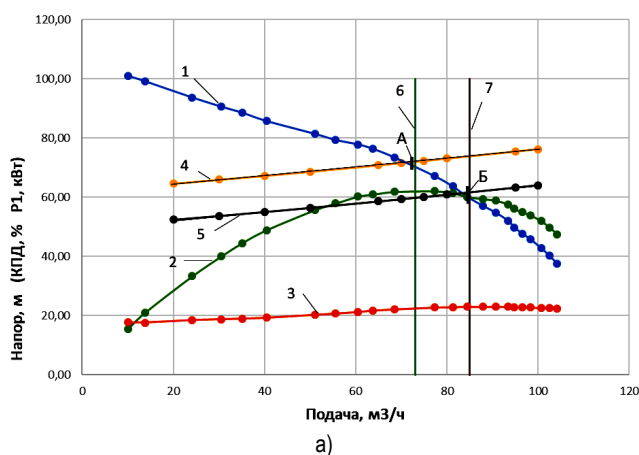
Периоды наблюдений составляли семь суток в зимний и летний периоды. При анализе полученных данных по давлению и подаче исключались значения, полученные при т. н. нестационарных режимах эксплуатации (включение в работу скважины, в которой проводятся наблюдения, моменты включения и выключения смежных скважин водозабора). Для дальнейшего анализа принимались данные измерений в диапазоне, охватывающем 80% значений рассматриваемого параметра. В данном случае исключались экстремальные значения, нехарактерные для типичного режима эксплуатации.

Для каждой скважины также по данным обследования скважин определялись эмпирические зависимости понижения S , м, от подачи Q , м³/ч, в виде линейных уравнений. Для оценки энергоэффективности насосного оборудования, установленного в скважинах водозабора, использовались данные протоколов испытаний погружных насосных агрегатов, которые производились на специальном испытательном стенде в соответствии с ГОСТ 6134 перед установкой насосного агрегата в скважину. Таким образом, учитывался возможный износ насосного агрегата в сравнении с характеристиками нового агрегата, которые декларируются производителем.

На характеристики насосного агрегата накладывались графики изменения напора насосного агрегата при максимальном и минимальном значении в диапазоне измеренных давлений в расчетном сечении, а также границы диапазона измеренных подач.

Графики изменения напора насосного агрегата при максимальном и минимальном значении на оголовке скважины рассчитывались в зависимости от подачи с учетом значений понижения в скважине и потерь напора между расчетным сечением 1-1 на входе в насос и сечением 2-2, где проводилось измерение давления (оголовок скважины).

Размещение отрезка на характеристике насосного агрегата, отсекаемого графиками зависимости требуемого напора от дебита скважины для максимальных и минимальных значений давления в расчетном сечении и границами диапазона подач позволяют оценить корректность подбора насосного агрегата и эффективность его эксплуатации в рассматриваемой скважине. Примеры для двух водозаборных скважин приведены на рисунке 3(а и б).



1 – характеристика насосного агрегата $H=f_1(Q)$, зависимость напора от подачи; 2 – характеристика насосного агрегата КПД $f_2(Q)$, зависимость КПД от подачи; 3 – характеристика насосного агрегата $P_1=f_3(Q)$, зависимость потребляемой мощности от подачи; 4 – зависимость требуемого напора от дебита скважины при максимальном значении давления в расчетном сечении; 5 – зависимость требуемого напора от дебита скважины при минимальном значении давления в расчетном сечении; 6, 7 – границы диапазона подач погружного насоса при эксплуатации

Рисунок 3 – Совмещенные графики характеристик насосного агрегата и скважины

Как следует из рисунка 3, для системы «скважина и насосный агрегат 3а» – отсекаемый отрезок на характеристике насосного агрегата соответствует диапазону максимальных значений на характеристике КПД. Для системы «скважина и насосный агрегат 3б» – отсека-

емый отрезок на характеристике насосного агрегата смещен в левую сторону по отношению к диапазону максимальных значений КПД.

Таким образом, можно сделать вывод о корректном подборе насосного оборудования для системы 3а и недостаточно корректном для системы 3б. В последнем случае требуется насосный агрегат с меньшей подачей и более высоким напором. Для системы 3а дальнейшее повышение энергоэффективности может быть достигнуто при использовании насосного оборудования с более высокими значениями КПД (меньший износ, улучшенные характеристики двигателя и т. д.).

Важнейшим показателем, характеризующим эффективность работы водозаборной скважины, является удельное энергопотребление на единицу объема поданной воды. На значение удельного энергопотребления скважин оказывают существенное влияние энергетические характеристики установленного в них насосного оборудования.

Совмещенные характеристики насосного агрегата и скважины, приведенные на рисунке 3, позволяют также определить усредненное значение удельного расхода электроэнергии на подачу 1 м^3 воды, которое может быть рассчитано как отношение среднего значения в диапазоне отрезка на графике зависимости потребляемой мощности к значению подачи.

Заключение

Проведенные исследования на действующих водозаборных скважинах позволили развить методику оценки насосных систем при ее применении на водозаборных скважинах. Предлагается производить оценку энергоэффективности насосных систем водозаборных скважин путем совместного анализа характеристик насосного агрегата и параметров водозаборной скважины, получаемых при статистической обработке данных ее эксплуатации за репрезентативный период.

Список цитированных источников

1. Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем : ГОСТ 33969 – 2016 (ISO/ASME 14414:2015).
2. Насосы динамические. Методы испытаний : ГОСТ 6134-2007 (ISO 9906:1999).
3. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб : справочное пособие / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. – 11-е изд., доп. – Москва : БАСТЕТ, 2016. – 428 с.

References

1. Power efficiency. Evaluation of pump systems energy efficiency : GOST 33969 – 2016 (ISO/ASME 14414:2015).
2. Dynamic pumps. Test methods : GOST 6134-2007 (ISO 9906:1999).
3. Shevelev, F. A. Tables for hydraulic calculation of water pipes: reference manual / F. A. Shevelev, A. F. Shevelev. – 11th ed., Supplement. – Moscow : BASKET, 2016. – 428 p.

Материал поступил в редакцию 28.02.2020