



# РАСЧЕТ ИНДЕКСОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУППОВЫХ СКВАЖИННЫХ ВОДОЗАБОРОВ

Фисенко В.Н.  
канд. техн. наук

«Ru Well Systems»

В основе методики расчета и выбора насосного оборудования, заложенной в старых технических нормативных документах, которой пользуются проектировщики и эксплуатационники, лежат устаревшие подходы. Они базируются, как правило, на выборе насосов из каталогов по предварительно определенному расходу (Q) и давлению (H) и практически не рассматривают комплексно насосную систему, как связанную многочисленными технологическими и экономическими критериями с системой водоснабжения и водоотведения в целом. Экономические же критерии, такие как стоимость жизненного цикла, расход электроэнергии, срок полезного использования, а также критерии надежности оборудования - срок службы, межремонтный период и др. не анализируются за прогнозный период работ.

Принятые в ЕС и России нормативные документы по энергоэффективности насосного оборудования обязывают операторов услуг водоснабжения и другие, добывающие подземные воды, организации эксплуатировать насосное оборудование в энергоэффективном диапазоне подач и напоров, зависящим от конкретной марки насоса, показателей и параметров технологического и энергоэффективного совершенства насоса и двигателя.

Энергоэффективность работы группового скважинного водозабора складывается из энергоэффективной работы отдельных скважин, входящих в его состав.

При проведении комплексных расчетов групповых водозаборов подземных вод на разных этапах расчетов необходимо систематически проверять соблюдение условий работы насосов в энергоэффективном диапазоне подач и напоров и вычислять индексы энергоэффективной работы как отдельных скважин, так и всего водозабора, т.к. суточный режим водопотребления определяет необходимость периодического включения различного числа скважин, и условия совместной работы последних на сборный водовод к резервуару существенно изменяются во времени и могут проходить в энергозатратных режимах функционирования скважинных насосов.

Известные программные продукты по комплексным расчетам водозаборов подземных вод данные требования не учитывают. Разобраны примеры энергозатратной работы подобранных насосов и запроектированного скважинного водозабора, где из 8 рассматриваемых скважин группового водозабора, работающих на сборный водовод, 4 работают за пределами как энергоэффективной, так и рабочей зоны используемых скважинных насосов.

Сформулированы предложения по закреплению в нормативных документах по водоснабжению требований по определению показателей энергоэффективности группового водозабора при проектировании и эксплуатации водозаборов и технических средств контроля и регулирования.

**Ключевые слова:** групповой скважинный водозабор, энергоэффективный режим центробежного насоса, индексы энергоэффективности, комплексные расчеты групповых водозаборов подземных вод.

## 1. Особенности гидравлического расчета совместной работы скважины и насоса

В системах водоснабжения на базе подземных вод применяются одиночные, либо группы буровых скважин, оснащенных погружными центробежными многоступенчатыми лопастными электронасосами типа ЭЦВ. Наиболее распространена двухступенчатая схема водоподъема, когда водоподъем из скважин производится в проме-

жуточный сборный резервуар, а из него после необходимой технологической обработки насосной станцией 2-го подъема подается непосредственно в разводящую сеть.

Одиночная скважина соединяется с промежуточным сборным резервуаром (водонапорной башней) отводящим трубопроводом, а в группе скважин каждая присоединяется отводящим трубопроводом к сборному трубопроводу, транспортирующему откачиваемую воду в сборный резервуар.

Особенностью гидравлического расчета подобных систем является необходимость учета избыточного (свободного) напора насоса  $H_{св}$  на устье скважины для преодоления гидравлических потерь в отводящих и сборном трубопроводах при транспортировке воды к сборному резервуару.

Подбор погружного насоса производится исходя из величины требуемого потребителю расхода  $Q_{np}$ , определяемого путем вычисления расчетного напора  $H_p$ , учитывающего высоту геодезического подъема  $H_z$  от статического уровня до поверхности, требуемый избыточный (свободный) напор  $H_{св}$  на устье скважины и гидравлические потери в зоне нагнетания  $h_{wn}$  насоса, понижение уровня  $S$  жидкости в скважине от начального положения - статического уровня до уровня, называемого динамическим.

$$H_p = H_z + h_{wn} + S + H_{св} \quad (1)$$

При расчете гидравлических потерь  $h_{wn}$  учитывают длину водоподъемных труб (глубину погружения насоса в PSWR системе водоподъема- [2,5]) как

$$L_{см} = H_z + S + \Delta h$$

где  $\Delta h = NPSH$  - это надкавитационный напор - запас, с которым погружной насос устанавливается под динамический уровень из условия устойчивой и безкавитационной работы (многие производители приводят зависимости в каталогах насосного оборудования).  $NPSH = f(Q)$

Если устье скважины изолируется от действия атмосферы, то в расчетных зависимостях (1) переходят от понижений к напорам в стволе скважины (на входе в насос) и на контуре питания для того, чтобы оценить приток жидкости в скважину

$$Y_p = (H_{св} - H_z) - h_{\phi} - h_{wv} - h_d \quad (2)$$

где  $h_{\phi}$  - гидравлические потери в фильтре скважины и призабойной зоне скважины,  $h_{wv}$  - гидравлические потери в зоне всасывания (глухой части обсадной колонны до насоса),  $h_d$  - гидравлические потери на обтекание электродвигателя насоса.

Действующий расчетный напор  $Y_p$  может также определяться в процессе эксплуатации насоса в скважине путем непрерывного или циклического измерения давления (разрежения) на входе в насос с помощью датчика давления, установлен-

ного вместе с насосом в скважину и подключенного к станции управления насосом на поверхности - причем передача сигнала датчика технически может быть осуществлена по силовому проводу электронасоса с использованием известной технологии PLC (англ. - power line communication). Производитель должен обеспечивать возможность накопления такой информации и передачи системам автоматического регулирования, либо диспетчеру - на пульт управления.

Реализация данной функции контроля давления в серийных насосах несет не только технико-экономические выгоды для энергосбережения, но и может использоваться как для периодического замера параметров обобщенного сопротивления скважины по индикаторным кривым восстановления давления после остановки насоса, контроля балансовых запасов подземных вод по колебанию уровней и напоров грунтовых вод, так и применения прогрессивных скважинных технологий водоподъема [1,2,3] и использования ствола скважины в дополнительных попутных технологических процессах [4].

По расчетному напору  $H_p(Y_p)$  определяют соответствующий расчетный расход  $Q_p \cong Q_{np}$  по напорно-расходной характеристике  $Q-H$  погружного насоса. Точка с параметрами  $(Q_p, H_p)$  - называется рабочей точкой насоса (рис.1) и характеризует совместную работу насоса и системы водоподъема. Положение рабочей точки на напорно-расходной характеристике  $Q-H$  в процессе эксплуатации **изменяется динамично** и определяется главным образом режимом работы скважины, влияющим на понижение уровня (напора) в стволе скважины и противодавление на устье скважины.

Полученный расчетный расход  $Q_p$  сравнивается с величиной расхода  $Q_{np}$ , требуемого потребителю, и если он не меньше, то выбранный погружной насос может считаться правильно подобранным и обеспечивающим расчетную производительность водозабора.

Многие производители скважинных насосов предлагают своим клиентам программы подбора насосного оборудования, как, например, примененную в [6], предлагающих, в результате гидравлического расчета, несколько вариантов рабочих точек системы водоподъема с различными марками насосов. Для каждого из вариантов указывается % отклонения от номинального расхода  $Q_p$ , соответ-

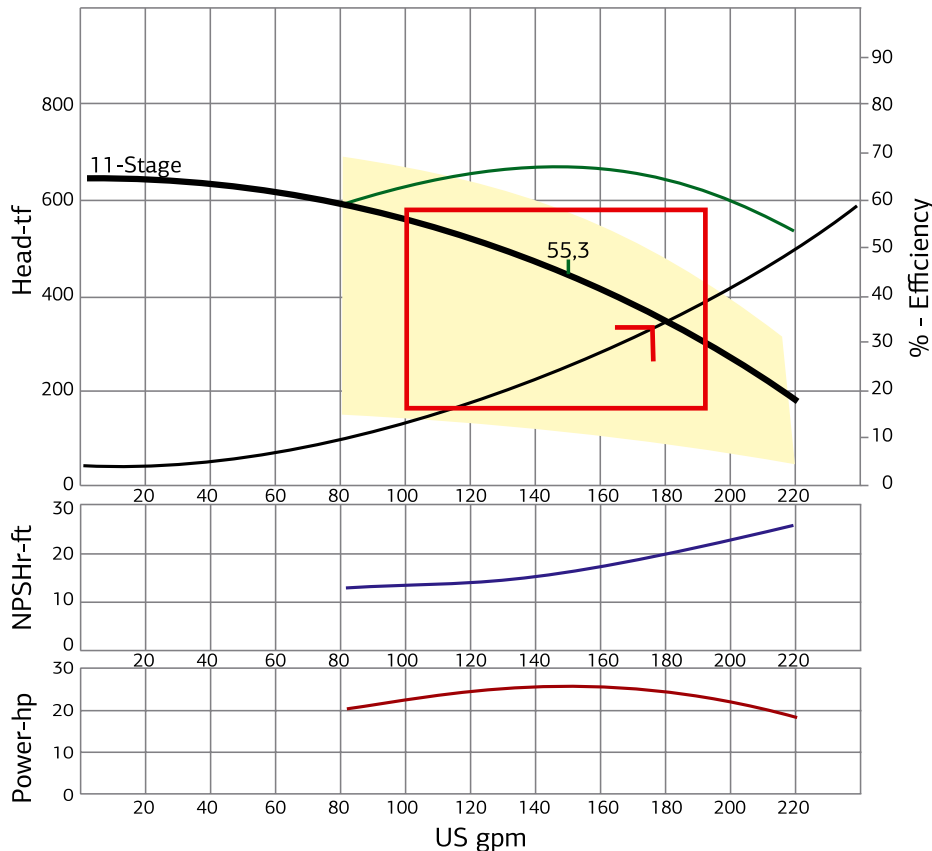


Рисунок 1

Рекомендуемое положение рабочей точки насоса и системы водоподъема на напорно-расходной характеристике Q-H насоса в течение жизненного цикла [5,14] работы насоса в скважине - внутри красного прямоугольника. Желтым цветом отмечена рабочая область насоса, красным прямоугольником-область энергоэффективной работы.

ствующего точке максимального к.п.д. – в нормативных документах ISO/ASME эта точка обозначается  $Q_{BEP}$ , а энергоэффективная зона работы насоса имеет границы: левую –  $Q_{PL}$  и правую –  $Q_{OL}$ .

## 2. Особенности выбора насоса

Существует некоторая неоднозначность в выборе конкретной марки насоса и конкретного производителя насосов, основывающаяся на субъективных предпочтениях и личном опыте проектировщика (покупателя насосного оборудования), никак не связанных с требуемыми нормативными сроками эксплуатации скважин и физико-химическими условиями взаимодействия водозабора как техногенного сооружения с природной средой.

Так, например, при проектировании простейшего водозабора, состоящего из одиночной скважины с водоподъемом с глубины 90-100 м и проектной производительностью  $Q_{np} = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ , возможен выбор вариантов из 17 марок скважинных насосов, 9 производителей из 7 стран.

В качестве дополнительного, существенного эксплуатационного показателя, определяющего технический уровень и качество насосной продукции, заложенных производителем на этапе разработки насоса, выделяют [7], запас напора  $SP_{(0,75)} = tg\beta$  (рис. 1) на протяжении энергоэффективного жизненного цикла насоса - периода времени в течение которого происходит падение подачи насоса от  $Q_0$  (номинальная подача) до  $0,75Q_0$ . За пределами энергоэффективного диапазона работа насоса характеризуется повышенным энергопотреблением и происходит в области более низких значений к.п.д.

Показатель  $SP_{(0,75)}$  определяется как тангенс угла наклона напорно-расходной характеристики Q-H в точке  $Q_0$  для интервала  $[Q_{PL}; Q_{BEP}]$

$$SP_{(0,75)} = tg\beta = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{\Delta H}{(1-n)Q_0} = \frac{4\Delta H}{Q_0} \quad (3)$$

Особый интерес представляет также запас напора  $SP_{(0,7)} = tg\beta_1$  на протяжении рабочего

жизненного цикла насоса - периода времени в течение которого происходит падение подачи насоса от  $Q_0$  (номинальная подача) до левой крайней границы рабочей зоны насоса - как правило,  $0,7Q_0$ , но может достигать у некоторых марок насосов и  $0,4Q_0$ . Размер рабочей зоны насоса определяет производитель на основании параметрических испытаний, и за пределами рабочей зоны работа насоса не допускается, т.к. этот режим считается нерасчетным и возможны повреждения и поломки отдельных деталей насоса при длительной работе на нерасчетных режимах.

Запас напора для рабочего  $SP_{(0,7)}$  и энергоэффективного  $SP_{(0,75)}$  диапазонов погружных скважинных насосов различных производителей типоразмера 6"(8")Sub.PUMP-50Hz-40-90 приводился автором в [8].

Показатель  $SP_{(0,7)}$  определяется как тангенс угла наклона напорно-расходной характеристики  $Q-H$  в точке  $Q_0$  для  $[0,7Q_0; Q_{БЕР}]$

$$SP_{(0,7)} = \operatorname{tg}\beta_1 = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{\Delta H}{(1-n)Q_0} = \frac{10}{3} \frac{\Delta H}{Q_0} \quad (4)$$

Расчеты показывают, что у насосов, использованных для примера - [8] с крутопадающими ( $\operatorname{tg}\beta=2,833$ )  $Q-H$  характеристиками, энергоэффективный жизненный цикл и рабочий жизненный цикл в среднем в 1,67 раза превышает по длительности соответствующий цикл у насосов с пологими ( $\operatorname{tg}\beta=1,0$ )  $Q-H$  характеристиками.

### 3. Энергозатратность водоподъема из скважины

Для того, чтобы выяснить только лишь одна крутизна напорно-расходной характеристики насоса в энергоэффективном диапазоне влияет на длительность энергоэффективного цикла работы насоса в скважине и ранжирование всей рассматриваемой линейки насосов по энергозатратности водоподъема, проведем расчет забора воды из скважины объемом 800000 м<sup>3</sup>.

В таблице 1 указано количество поданной воды в течение энергоэффективного жизненного цикла рассматриваемых насосов в зависимости от скорости роста гидравлических сопротивлений в водоприемной части скважины и призабойной зоне во времени – максимальной и минимальной.

При расчетном водозаборе 800000 м<sup>3</sup> первый насос с максимальным  $SP_{(0,75)}=2,833$  обеспечивает необходимый объем водоподдачи 811033 м<sup>3</sup> в течение энергоэффективного цикла, при средней скорости роста гидравлических сопротивлений в водоприемной части скважины и призабойной зоне.

В расчете на этот объем водоподдачи как эталона – рабочая точка *Pedrollo-6SR36/15* ( $Q_0; H_0$ )=(36;93), пересчитаны удельные энергозатраты остальных насосов и выделена доля объема воды, который был поднят за пределами энергоэффективного диапазона каждого из насосов - графа «Доля затратной подачи, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>».

Отрицательные значения у двух насосов свидетельствуют, что у этих марок насосов объем водоподдачи также превышает проектный объем - детальное рассмотрение вспомогательных параметров показывает, что указанные насосы имели большие, чем эталон номинальные расходы: *Calpeda-6SDS 42/10* -  $Q_0=42$  м<sup>3</sup>/ч и *Pedrollo-6SR44/13* -  $Q_0=44$  м<sup>3</sup>/ч при достаточно высоких значениях  $SP_{(0,75)}$ .

Наиболее затратные значения (более 30% расчетной подачи с повышенным энергопотреблением) наблюдалось у *Rowatty-50Hz-6E1N/9A-617* несмотря на высокое значение  $SP_{(0,75)}$ , по причине меньшего номинального расхода -  $Q_0=30$  м<sup>3</sup>/ч, и у насосов *HT-50Hz-S150 B-9* с подачей  $Q_0=36$  м<sup>3</sup>/ч, и *GMS-50Hz-ЭЦВ8-40-9* с подачей  $Q_0=40$  м<sup>3</sup>/ч, имевших низкие значения  $SP_{(0,75)}$  близкие к 1. Остальные насосы расположились в интервале 10-20% повышенного энергопотребления при подаче заданного количества воды.

Таким образом, при проектировании водозабора требуемой производительности и проведении вариантного сравнения энергозатратности водоподъема погружными насосами различных производителей необходимо учитывать, что максимальную длительность энергоэффективного цикла имеют погружные насосы с наибольшим  $SP_{(0,75)}$  и при наибольшем номинальном расходе  $Q_0=Q_{БЕР}$  показывают наилучшую энергоэффективность по удельным показателям (на единицу поднимаемой жидкости). Насосы с меньшими показателями  $SP_{(0,75)}$  и  $Q_0$  могут обеспечить подъем в энергоэффективном диапазоне одну часть заданного объема и вторую часть с повышенными энергозатратами. Соотношение энергоэффективной



Оценка увеличения энергопотребления в зависимости от длительности энергоэффективного жизненного цикла насоса [9,14] и темпа роста гидравлических сопротивлений в водоприемной части скважины [5,14] (проектный объем забора воды - 800 000 м<sup>3</sup>)

Таблица 1

Марка насоса	Период, месяцев		O <sub>0</sub> =O <sub>ВЕР</sub>		0,75O <sub>0</sub>		СРЕДНЕЕ ЗА ЦИКЛ		Итого	Доля затратной подачи, М <sup>3</sup> /М <sup>3</sup>		
	O <sub>0</sub> =O <sub>ВЕР</sub>	C <sub>0</sub> γ <sub>0</sub> = 0,0613	C <sub>0</sub> γ <sub>0</sub> = 0,0084	W <sub>МИН</sub>	W <sub>МАКС</sub>	W <sub>МИН</sub>	W <sub>МАКС</sub>	W <sub>МИН</sub>			W <sub>МАКС</sub>	W, М <sup>3</sup>
Pedrollo-6SR36/15	36	8,65	62,87	224084	1629705	27	168063	1222278	196074	1425992	811033	0,00%
Calpeda-6SDS 32/10	33	8,40	61,08	199545	1451238	24,75	149659	1088428	174602	1269833	722217	10,95%
Franklin Electric-60Hz-150SR-15HP-7	34,5	7,87	57,27	195594	1422505	25,88	146696	1066879	171145	1244692	707919	12,71%
Calpeda-6SDS 42/10	42	7,58	55,15	229315	1667745	32	171986	1250809	200651	1459277	829964	-2,33%
Rowattwy-50Hz-6E2/10-625	42	7,25	52,72	219228	1594382	31,5	164421	1195786	191824	1395084	793454	2,17%
Pedrollo-6SR44/13	44	7,14	51,91	226113	1644460	33	169585	1233345	197849	1438902	818376	-0,91%
Rowattwy-50Hz-6E1N/9A-617	30	7,09	51,58	153199	1114172	22,5	114899	835629	134049	974900	554475	31,63%
KSB-50Hz-UPA200-11-6	36	6,71	48,78	173856	1264405	27	130392	948304	152124	1106354	629239	22,42%
Lowara-50Hz-Z642-10	42	6,61	48,08	199933	1454056	31,5	149950	1090542	174941	1272299	723620	10,78%
CNP-50Hz-SJ42-10	42	6,56	47,73	198464	1443373	31,5	148848	1082530	173656	1262952	718304	11,43%
Grundfos-50Hz-SP-46-10	46	6,48	47,12	214598	1560715	34,5	160949	1170536	187773	1365625	776699	4,23%
Stuewa-50Hz-STU6.45-10S	44	6,27	45,58	198530	1443852	33	148897	1082890	173714	1263371	718542	11,40%
Wilo-50Hz-TWI6.50-10-C	45	6,00	43,62	194331	1413320	33,75	145749	1059990	170040	1236655	703347	13,28%
KSB-50Hz-UPA150C-48-10	46	5,83	42,40	193109	1404428	34,5	144832	1053321	168970	1228874	698922	13,82%
HT-50Hz-S150 B-9	36	5,33	38,74	138064	1004098	27	103548	753074	120806	878586	499696	38,39%
GMS-50Hz-ЭЦБ8-40-90	40	5,18	37,69	149233	1085331	30	111925	813998	130579	949664	540122	33,40%
Standart Sub.PUMP-50Hz-40-90	39,9	3,67	26,68	105404	766571	29,9	79053	574928	92228	670750	381489	52,96%

водоподачи и с повышенными энергозатратами необходимо определять при проведении вариантного сравнения.

В качестве дополнительного критерия при сравнении одноступенчатых марок погружных насосов различных производителей с близкими или равными  $SP_{(0,75)}$  следует выбирать насос [8, 9] с наибольшим индексом

$$K_{ev0} = \frac{\eta_0 Q_0}{H_0} = \max$$

Для стадии проектирования (реконструкции действующих) скважинных водозаборов целесообразно вводить в сервисные программные продукты [6] производителей насосов, по подбору насосного оборудования, дополнительные блоки вариантного анализа возможной энергозатратной эксплуатации подбираемых насосов.

#### 4. Индексы динамики изменения энергопотребления водоподъема из скважины

В качестве текущего критерия энергоэффективности водозабора возможно использование коэффициента энергоэффективности водоподъема  $K_{ev}$  [6], определяемого как количество кубических метров воды поднятых на поверхность в расчете на 1 кВт затраченной насосом мощности. Сравнение текущего показателя  $K_{evi}$  проводится с первоначальным  $K_{ev0}$ , определенным в начальный момент эксплуатации, например, соответствующим подаче насоса в точке максимального КПД -  $[H_{BEP}; Q_{BEP}]$ .

В работе [9] показано каким образом показатели технического уровня и качества применяемого на водозаборе насоса влияют на динамику изменения энергопотребления водозабора:

а) по завершению энергоэффективного жизненного цикла насоса в скважине – периода времени, в течение которого происходит падение подачи насоса от  $Q_0$  (номинальная подача) до  $0,75Q_0$

$$I_e = \frac{K_{ev0}}{K_{ev1}} = \frac{4 \eta_0}{3 \eta_1} \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{Q_0}{H_0} \operatorname{tg} \beta \right) \quad (5)$$

б) по завершению рабочего жизненного цикла насоса в скважине – периода времени, в течение которого происходит падение подачи насоса от  $Q_0$  до  $0,7Q_0$

$$I_r = \frac{K_{ev0}}{K_{ev1}} = \frac{10 \eta_0}{7 \eta_1} \left( 1 + \frac{3}{10} \frac{Q_0}{H_0} \operatorname{tg} \beta_1 \right) \quad (6)$$

Динамика изменения энергоэффективности водозабора  $K_{ev0}/K_{ev1}$  определяется запасом напора  $SP_{(0,75)}$  и  $SP_{(0,7)}$ , определяемых по формулам (3) и (4) и различна для марок насосов, рассмотренных выше [8,9].

Индексы динамики изменения энергопотребления насоса  $I_e$ ,  $I_r$ ,  $I_x$  характеризуют темп изменения коэффициента энергоэффективности водоподъема соответственно: в энергоэффективном цикле насоса, в рабочем цикле насоса и при проверке текущей энергоэффективности -  $I_x$ , например в ходе инспекций [8] по ГОСТ 33969-2016 «ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ СИСТЕМ».

Область допустимых значений индекса  $1 \leq I_e \leq 1,563$ , соответствующая границам энергоэффективного диапазона  $[Q_{PL}; Q_{BEP}]$  для насоса с пологой  $Q-H$  характеристикой ( $SP_{(0,75)}=1,0$ ), отличается от области допустимых значений того же индекса  $1 \leq I_e \leq 1,781$  для насоса с крутой  $Q-H$  характеристикой ( $SP_{(0,75)} = 2,833$ ).

Область допустимых значений индекса  $1 \leq I_r \leq 1,772$ , соответствующая границам рабочего диапазона  $[0,7Q_{BEP}; Q_{BEP}]$  для насоса с пологой  $Q-H$  характеристикой ( $SP_{(0,7)}=0,917$ ), отличается от области допустимых значений того же индекса  $1 \leq I_e \leq 1,985$  для насоса с крутой  $Q-H$  характеристикой ( $SP_{(0,7)} = 2,833$ ).

При работе насоса на нерасчетных режимах за пределами рабочего диапазона, установленного производителем, длительность безотказной работы насоса зависит от запаса надежности отдельных узлов и элементов насоса и соответствует моменту поломки или выхода из строя узла (элемента) насоса.

#### 5. Индексы энергоэффективности отдельных скважин с погружными центробежными насосами и группового скважинного водозабора

Для комплексного расчета групповых скважинных водозаборов предлагается ряд специализированных программ [1,10,11] не в полной мере соответствующих изменившимся требованиям энергоэффективности.



Так, например, управление режимом работы группы водозаборных скважин с погружными центробежными насосами, работающими на сборный водовод, путем дроссельного регулирования потокораспределения в сборном водоводе [10], используемого для транспортировки потоков воды от скважин к сборному резервуару, является неэкономичным с позиций энергосбережения, т.к. несмотря на возможность за счет регулирования добиться максимального количества воды поступающей в сборный резервуар, **существуют постоянные потери напора в дросселях, требующие дополнительных затрат электроэнергии.** Кроме того, авторы упрощенно рассматривают задачу считая, что погружные насосы создают постоянные напоры в узлах сборного водовода, вне зависимости от степени наполнения сборного резервуара, тогда как рабочие напоры подачи насосов и понижения уровня воды в скважинах различны при минимальном и максимальном уровнях воды в сборном резервуаре и изменяются в процессе наполнения резервуара.

Указанные недостатки отсутствовали в программах комплексного расчета водозаборов подземных вод: как ранних - ВНИИВОД-ГЕО [1], так и более поздних - БНТУ [11], по проведению гидрогеологического и гидравлического расчета, как отдельного водозабора, так и группы скважин, работающих на сборный водовод, позволяющих рассчитывать расходы, напоры, понижения уровня в скважинах в динамике, для различных условий эксплуатации, включая возможность учета роста гидравлического сопротивления фильтра и призабойной зоны скважины на различные моменты времени. К числу недостатков можно отнести приверженность к тому же методу дроссельного регулирования потокораспределения от скважин и отсутствия поверочных расчетов нахождения рабочих точек скважинных насосов в энергоэффективных и рабочих диапазонах [7], что вполне объяснимо с позиций, существовавших в тот период подходов к энергосбережению.

Существовавшие до настоящего времени подходы [1,10,11,12] к проектированию и эксплуатации скважинных групповых водозаборов подземных вод с погружными центробежными насосами также не учитывали современные требования к энергоэффективности [8], формализованные в новом ГОСТ 33969-2016 «Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем».

Так в примере [13] группового водозабора, представляющего линейный ряд из 8 скважин с однотипными погружными насосами ЭЦВ10-120-60, подключенных к сборному водоводу, обеспечивающему транспортировку откачиваемых подземных вод в сборный резервуар, из 8 насосов только 4 насоса работают в энергоэффективном диапазоне, а остальные 4 насоса работают не только за пределами энергоэффективного диапазона, но даже за пределами рабочего диапазона установленного производителем.

Покажем на данном примере порядок расчета индексов энергоэффективной эксплуатации скважин с погружными насосами группового скважинного водозабора и оценки энергоэффективной эксплуатации группового скважинного водозабора в целом.

Формализованные технологические параметры указанного типа насосов представлены в таблице 2, а рассчитанные в соответствии с [8,9] показатели высокой энергетической эффективности приведены в таблице 3.

Левая граница энергоэффективного ( $Q_x/Q_0 \in [0,75; 1]$ ) диапазона работы погружного скважинного центробежного насоса определяются по формулам [6,7,8,9]

$$I_c = \frac{K_{ev0}}{K_{ev1}} = \frac{4 \eta_0}{3 \eta_1} \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{Q_0}{H_0} \operatorname{tg} \beta \right)$$

$$K_{ev0} = \frac{Q_0}{N_0}; K_{ev1} = \frac{Q_1}{N_1};$$

$$Q_0 = Q_{BEP} \Leftrightarrow (\eta = \max);$$

$$H_0 = f(Q_0);$$

$$Q_1 = nQ_0; \Leftrightarrow n = 0,75;$$

$$H_1 = H_0 + \Delta H;$$

$$SP_{(0,75)} = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{\Delta H}{(1-n)Q_0} = \frac{4\Delta H}{Q_0}$$

Левая граница рабочего ( $Q_x/Q_0 \in [0,7; 1]$ ) диапазона работы погружного скважинного центробежного насоса определяются по формулам [6,7,8,9]

$I_e = \frac{K_{ev0}}{K_{ev1}} = \frac{10 \eta_0}{7 \eta_1} \left( 1 + \frac{3 Q_0}{10 H_0} \operatorname{tg} \beta_1 \right);$ $K_{ev0} = \frac{Q_0}{N_0}; K_{ev1} = \frac{Q_1}{N_1};$ $Q_0 = Q_{BEP} \Leftrightarrow (\eta = \max);$ $H_0 = f(Q_0);$ $Q_1 = nQ_0; \Leftrightarrow n = 0,7;$ $H_1 = H_0 + \Delta H;$ $SP_{(0,7)} = \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{\Delta H}{(1-n)Q_0} = \frac{10 \Delta H}{3 Q_0}$	$I_x = \frac{K_{ev0}}{K_{evx}} = \frac{\eta_0}{\eta_x} \left( \frac{H_x Q_0}{Q_x H_0} \right)$ <p>Соотношение индексов динамики изменения энергопотребления насоса <math>I_e, I_r, I_x</math> характеризует положение рабочей точки насоса и системы водоподъема в определенной части напорно-расходной характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• критерий работы насоса в энергоэффективной части напорно-расходной характеристики <math>I_e &gt; I_x &gt; I_r</math>;</li> <li>• критерий работы насоса за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики, но в пределах рабочей зоны установленной производителем <math>I_r &gt; I_x &gt; I_e</math>;</li> <li>• критерий работы насоса за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики и за пределами рабочей зоны, установленной производителем, т.е. работа насоса на нерасчетных режимах <math>I_x &gt; I_r</math>;</li> </ul>
--	--

Индекс динамики изменения энергопотребления при водоподъеме из скважины  $I_x$  для текущей подачи насоса  $Q_x$  определяется по формуле

Показатели технического уровня (технологические) скважинного электронасоса ЭЦВ10-120-60

Таблица 2

Q/Q <sub>0</sub>	0,7	0,75	1	1,1	1,2
Q, м <sup>3</sup> /ч	84	90	120	132	144
H, м	70	69	62	55	44
η	0,65	0,67	0,73	0,73	0,7
N(P <sub>2</sub> ), кВт	25	25,5	27,5	27,5	24,5

Показатели технического уровня ( высокой энергетической эффективности) скважинного электронасоса ЭЦВ10-120-60

Таблица 3

	SP <sub>0,7</sub>	SP <sub>0,75</sub>	-	-
tgβ <sub>1</sub> , tgβ	0,222	0,233	-	-
Kev0	-	-	4,3636	
Keve	-	3,5294		
Kevr	3,3600			
I <sub>e</sub>	-	1,616755	1	Индекс границы энергоэффективной зоны
I <sub>r</sub>	1,811414			Индекс границы рабочей зоны





Расчет индексов динамики изменения энергопотребления насосов ЭЦВ10-120-60 при работе группового скважинного водозабора

Таблица 4

погружной насос ЭЦВ 10-120-60	Скважина1	Скважина2	Скважина3	Скважина4	Скважина5	Скважина6	Скважина7	Скважина8
номинальная подача, м <sup>3</sup> /ч	120	120	120	120	120	120	120	120
номинальный напор, м	62	62	62	62	62	62	62	62
номинальная мощность, кВт	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
номинальный КПД	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
К <sub>ев0</sub>	4,3636	4,3636	4,3636	4,3636	4,3636	4,3636	4,3636	4,3636
граница энергоэффективной подачи, м <sup>3</sup> /ч	90	90	90	90	90	90	90	90
напор границы эфф зоны, м	69	69	69	69	69	69	69	69
КПД	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
расчетная мощность(по подаче), кВт	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5
К <sub>евг</sub>	3,5294	3,5294	3,5294	3,5294	3,5294	3,5294	3,5294	3,5294
граница рабочей зоны, м <sup>3</sup> /ч	84	84	84	84	84	84	84	84
напор границы рабочей зоны, м	70	70	70	70	70	70	70	70
КПД	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
расчетная мощность(по подаче), кВт	25	25	25	25	25	25	25	25
К <sub>евг</sub>	3,3600	3,3600	3,3600	3,3600	3,3600	3,3600	3,3600	3,3600
фактическая подача насосов Q <sub>ф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	100	75	75	83	99	98	95	78
фактический напор, м	67,5	71	71	70	67,6	67,7	68	70,5
КПД	0,7	0,6	0,6	0,64	0,695	0,695	0,69	0,62
расчетная мощность(по подаче), кВт	26,2	24	24	25	26,05	25,9	26	24,2
К <sub>евг</sub>	3,8168	3,1250	3,1250	3,3200	3,8004	3,7858	3,6538	3,2231
работа за пределами эфф зоны, м <sup>3</sup> /ч	0	-15	-15	-7	0	0	0	-12
работа за пределами рабочей зоны, м <sup>3</sup> /ч	0	-9	-9	-1	0	0	0	-6
I <sub>e</sub>	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168
I <sub>r</sub>	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114
I <sub>x</sub>	1,3624	2,2292	2,2292	1,8619	1,3882	1,4044	1,4657	2,0598

Для указанных марок насосов ЭЦВ10-120-60 соотношения индексов динамики изменения энергопотребления насоса  $I_e$ ,  $I_r$ ,  $I_x$  имеют следующий вид:

- критерий работы насоса в энергоэффективной части напорно-расходной характеристики  $1,6168 > I_x > 1$ ;
- критерий работы насоса за пределами энерго-эффективной части напорно-расходной характеристики, но в пределах рабочей зоны, установленной производителем  $1,8114 > I_x > 1,6168$ ;
- критерий работы насоса за пределами энерго-эффективной части напорно-расходной характеристики и за пределами рабочей зоны, установленной производителем, т.е. работа насоса на нерасчетных режимах  $I_x > 1,8114$ .

Расчет индексов динамики изменения энергопотребления насосов ЭЦВ10-120-60 при работе группового скважинного водозабора приведен в Таблице 4.

Проверка соответствия критериям энергоэффективной эксплуатации показывает, что насосы скважин 2,3,4 и 8 работают за пределами энерго-эффективной части напорно-расходной характеристики и за пределами рабочей зоны, установленной производителем, т.е. работа насосов происходит на нерасчетных режимах.

Средний индекс текущей динамики энергоэффективности  $I_x$  всех скважин водозабора для текущих подач насосов  $Q_x$  также показывает, что часть насосов работает за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики.

$$I_{x\text{ сум}} = \frac{\sum I_x}{n} = 1,75 > 1,6168$$

Оценка энергоэффективной эксплуатации группового скважинного водозабора в целом заключается в установлении соответствия между недостатком до номинальной подачи насосов и недостатком до номинальной мощности насосов. Первый показатель характеризует уровень недополучения потребителем добываемых водных ресурсов, а второй показатель характеризует уровень отклонения от расчетной потребляемой мощности. Итоговые данные сведены в Таблицу 6.

Таким образом, работу погружных насосов группового скважинного водозабора в целом можно охарактеризовать как происходящую вне энергоэффективной зоны напорно-расходной характеристики насосов, т.к. рабочие точки половины насосов находятся вне энергоэффективной части напорно-расходной характеристики, и за пределами рабочей зоны, установленной производителем, т.е. работа насосов происходит на нерасчетных режимах. Это приводит к тому, что доля подач повышенного риска потерь от общей производительности водозабора составляет 44,25%. Такие потери могут произойти в результате поломки насосов, работающих на нерасчетных режимах.

Уровень недополучения потребителем добываемых водных ресурсов составляет 26,8% при отклонении от номинальной мощности насосов (в сторону снижения) на 8,5%. Средние потери подачи на 1 кВт отклонения от номинальной мощности составили 13,78 (м<sup>3</sup>/ч)/кВт, что убедительно подтверждает [14] необходимость применения технических средств контроля и регулирования положения рабочих точек насосов в энергоэффективных зонах напорно-расходных характеристик насосов.

## Послесловие

В основе методики расчета и выбора насосного оборудования, заложенной в старых технических нормативных документах, которой пользуются проектировщики и эксплуатационники, лежат устаревшие подходы. Они базируются, как правило, на выборе насосов из каталогов по предварительно определенному расходу ( $Q$ ) и давлению ( $H$ ) в предположении, что данные величины являются постоянными (фиксированными) в течении срока эксплуатации насоса и на основе этих данных проводятся дальнейшие технико-экономические расчеты и сравнения вариантов выбора оборудования. Что интересно, на таких же подходах обучают студентов профильных специальностей «Водоснабжения...» даже в ведущих учебных заведениях.

Практически не рассматривается комплексно насосная система, как связанная многочисленными технологическими и экономическими критериями с системой водоснабжения и водотведения в целом [15], не вычисляется КПД всей системы водоснабжения и ее отдельных этапов исходя из элементарного сопоставления



### Индексы энергоэффективной эксплуатации погружных насосов группового скважинного водозабора

Таблица 5

Погружной насос ЭЦВ 10-120-60	Скв.1	Скв.2	Скв.3	Скв.4	Скв.5	Скв.6	Скв.7	Скв.8	Средн. значение
$I_e$	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	1,6168	
$I_r$	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	1,8114	
$I_x$	1,3624	2,2292	2,2292	1,8619	1,3882	1,4044	1,4657	2,0598	1,75
подачи насосов $Q_x$ , м <sup>3</sup> /ч	100	75	75	83	99	98	95	78	
Доля в суммарной подаче, %	14,22	10,67	10,67	11,81	14,08	13,94	13,51	11,10	
Доля подач повышенного риска потерь / Доля подач в оптимальном диапазоне, %/%									44,25/ 55,75

### Оценка энергоэффективной эксплуатации группового скважинного водозабора в целом

Таблица 6

значение текущей подачи насосов, м <sup>3</sup> /ч	703	
значение номинальной подачи насосов, м <sup>3</sup> /ч	960	
недостаток до номинальной подачи насосов, м <sup>3</sup> /ч	257	26,8%
значение потребляемой насосами мощности, кВт	201,35	
значение номинальной мощности насосов, кВт	220	
недостаток до номинальной мощности насосов, кВт	18,65	8,5%
$K_{evI}$ /текущий/(м <sup>3</sup> /ч)/кВт	3,4914	
$K_{evO}$ /номинальный/(м <sup>3</sup> /ч)/кВт	4,3636	
средние потери подачи на 1 кВт отклонения от номинальной мощности, (м <sup>3</sup> /ч)/кВт	13,7802	

### Сводные показатели энергоэффективной эксплуатации группового скважинного водозабора

Таблица 7

Доля насосов работающих вне энергоэффективного диапазона	50%
В том числе доля насосов работающих вне рабочего диапазона	50%
Доля подач повышенного риска потерь в результате отказов насосов	44,25%
Недостаток до номинальной подачи насосов,	26,8%
Недостаток до номинальной мощности насосов	8,5%
Средние потери подачи на 1 кВт отклонения от номинальной мощности, (м <sup>3</sup> /ч)/кВт	13,78

отношения совершенной полезной работы и фактически затраченной. В ЕС, например, уже озаботились, что их системы водоотведения имеют КПД всего 0,20-0,35 и усиленно рассматривают методы повышения энергоэффективной работы действующего оборудования (включая утилизацию избыточно затрачиваемой энергии), экономического стимулирования выпуска оборудования высокой энергетической эффективности и т.д.

Принятые в США, ЕС и России нормативные документы по энергоэффективности насосного оборудования обязывают операторов услуг водоснабжения и другие, добывающие подземные воды, организации эксплуатировать насосное оборудование в энергоэффективном диапазоне подач и напоров [8], зависящим от конкретной марки насоса, показателей и параметров технологического и энергоэффективного совершенства насоса и двигателя.

В РФ и на территории ЕврАзЭС к производителям насосного оборудования, держателям лицензий на строительство водозаборных скважин пока не предъявляется таких жестких требований, как в США и ЕС, что сказывается на качестве строительства, применяемого оборудования и методах оценки его эффективности. Сведений, которые представляют значительная часть производителей насосов недостаточно [7,9], чтобы спроектировать энергоэффективный водозабор с погружным центробежным насосом. Показатели технического уровня центробежных скважинных многоступенчатых насосов с погружным электродвигателем, отражаемые в рекламно-информационных каталогах, требуют упорядочивания и систематизации [16], исходя из требований принятых нормативно-правовых документов по энергоэффективности и энергосбережению.

Так, например, в п. 3 «Энергозатратность водоподъема из скважины» автором сознательно показано на примере, что насос с номинальной производительностью меньшей, чем требуемая проектная, обеспечивает энергоэффективную подачу всего требуемого объема воды, тогда как насос с номинальной производительностью равной проектной, обеспечивает энергоэффективную подачу только 2/3 требуемого объема воды, а 1/3 проходит в энергозатратном режиме, т.е. для водозаборов с такими насосами требуются специальные методы регулирования, например искусственное пополнение запасов подземных вод.

Исходя из фактора нехватки сведений в каталогах производителя (ОАО «ГМС») о динамических характеристиках электродвигателя при различной нагрузке, приводимый в статье расчет с использованием показателей мощности  $N(P_2)$  проведен для значения мощности на валу двигателя  $P_2$ . Более полный типовой расчет, на мощность потребляемую насосным агрегатом  $N(P_1)$  приведен с насосом европейского производителя в [16].

Практика эксплуатации показывает, что режим работы водозаборного сооружения определяется режимом водопотребления, определяющим порядок включения (выключения) насосов в скважинах и длительность промежутков времени стабильной работы (простоя) насосов, влиянием скважин друг на друга, выражающимся в колебаниях динамического уровня и перетоками из водоносных пластов, влияющих на положение статического уровня. Кроме того, существует долговременный объективный тренд роста гидравлических сопротивлений в водоприемной части скважины [5], влияющий на темп снижения удельного дебита и длительность энергоэффективного жизненного цикла скважины [5] и насосного оборудования [14].

Рабочая точка насоса и системы водоподъема (рис.1) перемещается влево-вправо относительно расчетного начального положения в зависимости от комбинации перечисленных выше условий и при этом имеет глобальный тренд смещения влево по характеристике насоса. Пример расчета индексов энергоэффективности насосного оборудования водозабора для подобных случаев и достаточно высокоэнергоэффективных европейских насосов проведен в [16].

Оценка высокого энергетического совершенства скважинных насосов, получающих преференциальные льготы от Правительства РФ при производстве, к сожалению, не базируется на показателях эксплуатационного энергетического качества. Так, в работе [16] показано, что темп падения расхода (подачи) насоса на энергоэффективном и рабочем диапазонах [7] и темп падения мощности на этих же диапазонах, **близки у насосов высокой энергетической эффективности**, т.к. коэффициент энергоэффективности водоподъема [6] остается стабильным или уменьшается незначительно на этих же диапазонах. Следовательно, в расчетах жизненного цикла насосов и сооружений у таких водозаборов будут



более высокие технико-экономические показатели в части энергосбережения, и оператор услуг водоснабжения будет нести меньшие издержки, что влияет на себестоимость подаваемой потребителю воды.

### Выводы

1. Проектирование и эксплуатацию скважинных водозаборов подземных вод с погружными центробежными насосами необходимо проводить из условия учета требований энергоэффективной эксплуатации насосов, формализованных в новом ГОСТ 33969-2016 «Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем».
2. При проведении инспекций энергоэффективности водозаборов и в программах подбора насосного оборудования, расчета скважинных водозаборов и комплексного расчета групповых скважинных водозаборов, как на промежуточных, так и на итоговых этапах, необходимо проводить поверочные расчеты нахождения рабочих точек скважинных насосов в энергоэффективных и рабочих диапазонах и учитывать показатели технического уровня (высокой энер-

гетической эффективности) насосов, вычисляя соответствующие индексы. При проведении вариантных расчетов учитывать соотношения энергоэффективной водоподдачи и поддачи с повышенными энергозатратами на различные периоды времени эксплуатации водозабора.

3. В плановой редакции переиздания ГОСТ 33969-2016 «Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем» должно быть жестко закреплено требование к эксплуатантам насосного оборудования о необходимости наличия технических средств контроля и регулирования положения рабочих точек насосов в энергоэффективных зонах напорно-расходных характеристик насосов.
4. Производителям насосного оборудования необходимо обеспечить непрерывное или циклическое измерение давления (разрежения) на входе в насос с помощью датчика давления, установленного вместе с насосом в скважину и подключенного к станции управления насосом, на поверхности и обеспечить возможность накопления такой информации. Данная норма должна быть учтена и закреплена в соответствующих разделах обновленной редакции СНиП.

### Литература:

1. ПОСОБИЕ по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84) //ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР, М., Стройиздат, 1989 - 272с.
2. Трусов М.М., Фисенко В.Н., Райт В.Я., Технология проектирования, строительства и эксплуатации, водозаборных вакуум-скважин с водоподъемом по колоннам обсадных труб погружными электронасосами. Установка насосная для беструбного водоподъема из скважин, г. Джембул, Облтипография, 1990 – 30с. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25541861>.
3. Фисенко В.Н., Гидравлическая оптимизация и оборудование водоподъема из скважин с беструбной установкой погружных электронасосов : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.04 /Всесоюз. комплекс. научно-исслед. и конструктор.-технологич. ин-т. - Москва, ВНИИ ВОДГЕО, 1991-25с. Режим доступа: <http://search.rsl.ru/ru/record/01000016527>.
4. Фисенко В.Н., Фисенко Ю.В., Фисенко Е.В., патент на изобретение RU 2341736, СПОСОБ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ "FILL WELL", бюллетень изобретений №35,2008. Режим доступа: <http://well-systems.ru/Researches2008/referat2341736.pdf>.
5. Фисенко В.Н., О жизненном цикле водозаборных скважин с погружными центробежными насосами. //Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. №4. с.46-52.
6. Фисенко В.Н., Энергосбережение при эксплуатации скважинных водозаборов подземных вод// Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 11. С. 22–33.
7. Фисенко В.Н., О нормативном сроке службы погружных многоступенчатых центробежных электронасосов в скважинах//Международная научно-техническая конференция «ЕСОРPUMP-RUS'2016 «Энергоэффективность и инновации в насосостроении. Импортзамещение и локализация производства в России» - 26 октября 2016г., Москва, Изд. МВЦ "Крокус-Экспо"-2016, с. 48-61.
8. 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. 24–28.
9. Фисенко В.Н., ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПОГРУЖНОГО НАСОСА НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СКВАЖИННОГО ВОДОЗАБОРА //В сборнике: ЯКОВЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ сборник докладов XII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 2017. С. 204-209.
10. Щербаков В.И., Пурусова И.Ю., Помогаева В.В., МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ВОДОПОДЪЕМНЫХ СКВАЖИН// Вестник МГСУ «Гидравлика. Инженерная гидрология. Гидротехническое строительство», 2015, № 12, с.118-124;
11. Ивашечкин В.В.,ШейкоА.М.,Михневич Э.И., Прогноз снижения удельного дебита скважин в процессе эксплуатации//Мелиорация, 2012, №2, с.33-43.
12. Фисенко В.Н., Критерии оптимизации режима эксплуатации водозаборной вакуум-скважины//В кн. «Вклад молодых ученых и специалистов в ускорение научно-технического прогресса»/материалы конференции/ Джембул, 1988
13. Щербаков В.И., Пурусова И.Ю., ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД //В сборнике: ЯКОВЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ сборник докладов XII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 2017. С. 248-252.
14. Фисенко В.Н., Жизненный цикл погружных центробежных насосов в водозаборных скважинах // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 7. С. 54–63.
15. Гуринович А.Д., Сычева Е.А., Оптимизация параметров и режимов работы скважинных водозаборов подземных вод// Вода Magazine. 2017. № 5. С. 30-35.
16. Фисенко В.Н., Индексы энергетической эффективности группы погружных центробежных насосов, работающих с переменным профилем нагрузки в водозаборных скважинах//Вода Magazine. 2017. № 9. С. 24–30.