



Индексы энергетической эффективности группы погружных центробежных насосов, работающих с переменным профилем нагрузки в водозаборных скважинах

Вячеслав Фисенко

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 промежуточный сборный резервуар, а из него, после необходимой технологической обработки, насосной станцией 2-го подъема 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 [12], т.е. часть мощности, насоса затрачивается непосредственно на водоподъем, а часть мощности, используется для транспортировки по сборному водоводу и преодоление сопротивления со стороны других работающих скважин водозабора [7].

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 энергосберегающих режимах функционирования скважинных насосов [8] - рис. 1, 2, 3, 4.

Практика эксплуатации скважинных водозаборов подземных вод свидетельствует о том, что реальные дебиты скважин после начала эксплуатации отличаются от проектных [2, 5]. Это происходит как в результате допущенных дефектов при строительстве и недоучета при проектировании факторов, влияющих на режим работы

Количественная оценка энергоэффективности группы насосных агрегатов скважинного водозабора подземных вод основывается на оценке энергоэффективной работы отдельных скважин, входящих в его состав. Вычисленные или определенные опытным путем нормированные средневзвешенные значения входных мощностей насосов, работающих в разных рабочих точках стандартного профиля нагрузки, при «линейном» зонировании напорно-расходной характеристики Q-H насоса позволят вычислить известные индексы энергоэффективности (EEI).

При укрупненном «глобальном» зонировании напорно-расходной характеристики Q-H насоса контрольные и текущие индексы динамики изменения энергопотребления насосов, соответствующие изменяющемуся нестандартному профилю нагрузки, позволяют вычислить не только те же индексы энергоэффективности (EEI), используя другую методологию, но и группу дополнительных, вспомогательных индексов, характеризующих качество энергетической эффективности отдельных насосов и группы насосов водозабора в целом.

Показана связь индекса энергоэффективности (EEI) и индекса динамики изменения энергопотребления насоса (I_x), приведены примеры.

Ключевые слова: центробежный многоступенчатый погружной насос, скважинный водозабор, рабочий цикл насоса, энергоэффективный цикл насоса, профиль нагрузки насоса, индексы энергоэффективности, интернет вещей, параметры управления скважинными насосами.

водозабора, так и в результате естественных процессов физико-химической коррозии [4] и обрастания фильтровой и обсадной колонн и различного вида кольматаций при фильтровой зоны скважины [2, 5, 6].

В отличие от применения центробежных насосов в промышленности эксплуатация погружных многоступенчатых центробежных электронасосов в скважине - это откачка жидкости из природной системы, подверженной влиянию стохастического набора факторов, влияющих на колебания напоров и притока в скважину. Тем не менее, для такой природной системы характерен устойчивый во времени тренд естественного падения напора на входе в насос (вследствие сработки уровней водоносного пласта), в результате чего происходит уменьшение притока жидкости в водоприемную полость скважины [2, 5]. В краткосрочном периоде наблюдений в такой системе характерны кратковременные, периодические, знако-

переменные колебания напора на входе (вследствие изменения уровня грунтовых вод) и выходе насоса (вследствие изменения противодавления сети) под действием внешних техногенных, природных факторов, режима водопотребления, влияющих на подачу насоса.

Следовательно, рабочая точка совместной работы насоса и системы водоподъема имеет тренд глобального смещения влево по напорно-расходной характеристике насоса от начального значения $Q = Q_{всп} \leftrightarrow (\eta = \max)$. При этом наблюдаются периодические перемещения рабочей точки вправо-влево по характеристике в зависимости от переменной нагрузки насоса [4], обусловленной указанными выше факторами.

Как правило, для соответствия режиму водопотребления населенного пункта на групповых скважинных водозаборах применяют каскадное регулирование-включением (выключением) в нужное время дополнитель-



ных скважин, поэтому в течение расчетного цикла (в данном случае - сутки) часть насосов может как работать с переменной нагрузкой, так и простаивать, поэтому целесообразно оперировать в дальнейших расчетах профилями стандартизированной нагрузки насосов (рис. 5), в зависимости от суточного графика водопотребления.

Таким образом, положение рабочей точки на напорно-расходной характеристике Q-H насоса в процессе его эксплуатации изменяется динамично и определяется главным образом режимом работы скважины, влияющим на понижение уровня (напора) в стволе скважины и противодавление на устье скважины [12]. Рассмотрим, как изменяется энергоэффективность работы центробежного погружного насоса в скважине на примересуточного режима водопотребления водозабора - рис. 1, 2, 3, 4, 5.

Концепция «линейного» зонирования [1] напорно-расходной характеристики Q-H насоса, заключающаяся в разделении последней на участки, соответствующие стандартизированному профилю нагрузки насоса и учете перемещения рабочей точки по указанным участкам, с целью определения нормированного средневзвешенного значения входных мощностей насосов была усовершенствована в [8] на базе достаточно давно известных подходов [9, 10, 11, 12] путем укрупнения и выделения трех глобальных зон местонахождения рабочей точки насоса и системы на напорно-расходной характеристике (рис. 6) - зоны энергоэффективной, зоны рабочей и зоны нерасчетных режимов:

1. Положение рабочих точек насоса и системы водоподъема на напорно-расходной характеристике Q-H насоса **в течение энергоэффективного жизненного цикла** [5, 6] функционирования насоса в скважине - внутри красного прямоугольника, интервал {0;1}.

2. Положение рабочих точек насоса и системы водоподъема на напорно-расходной характеристике Q-H насоса **в течение рабочего жизненного цикла** [5,6] функционирования насоса в скважине - внутри отмеченной желтым цветом рабочей области насоса, интервал {0;1;2}.

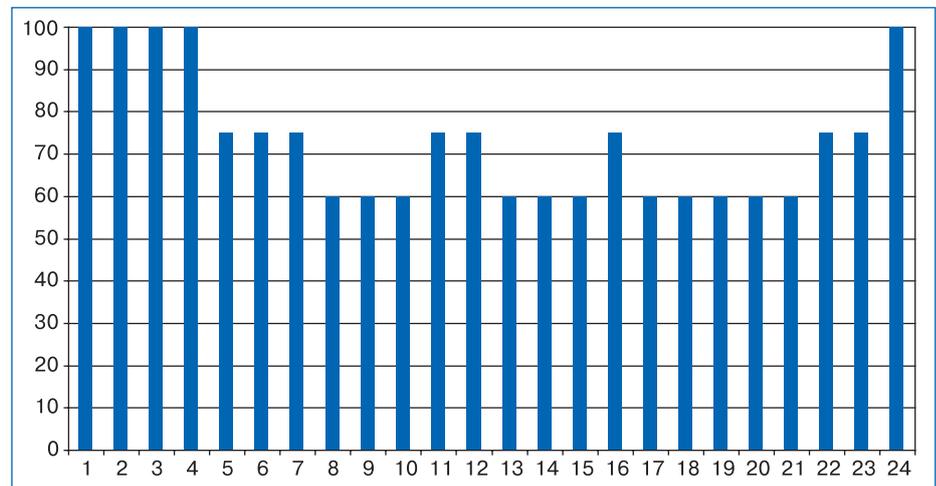
3. Положение рабочих точек насоса и системы водоподъема на напорно-расходной характеристике Q-H насоса **при работе на нерасчетных режимах** насоса в скважине - за пределами отмеченной желтым цветом рабочей области насоса, интервал {2;3}.

Левая граница энергоэффективного $(Q_y/Q_0) \in [0,75;1]$ диапазона работы погружного скважинного центро-

■ Рис. 1. Суточный график запуска насосов группового скважинного водозабора



■ Рис. 2. Суточный график нагрузки насоса 1-й скважины



■ Таблица 1. Показатели технического уровня (технологические) скважинного электронасоса Grundfos SP 125-3-17A01903/MS6000/

Q/Q ₀	0,7	0,75	1	1,1	1,2
Q, м ³ /ч	86,8	93	124	136,4	148,8
H, м	71,36	70,33	60,31	54,07	46,86
η _н	0,715	0,73	0,766	0,753	0,712
η _н *η _{дв}	0,605	0,616	0,644	0,63	0,596
E _с , кВт*ч/м ³	0,3207	0,3105	0,2548	0,2333	0,2136
N(P ₂), кВт	23,55	24,35	26,61	26,6	26,6
N(P ₁), кВт	27,83	28,86	31,67	31,77	31,78
NPSH, м	3,18	3,36	4,8	5,72	7,03

бежного насоса (точка 1) определяются по формулам [3, 4, 7, 8]¹ - контрольный индекс энергоэффективной зоны:

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

Левая граница рабочего $(Q_y/Q_0) \in [0,7;1]$ диапазона работы погружного скважинного центробежного насоса (точка 2) определяются по формулам

[3,4,7,8] - контрольный индекс рабочей зоны:

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

Индекс динамики изменения энергопотребления при водоподъеме из скважины k для текущей подачи насоса Q_x определяется по формуле [4, 8] - текущий индекс динамики изменения энергопотребления:

¹ В расчетных формулах:

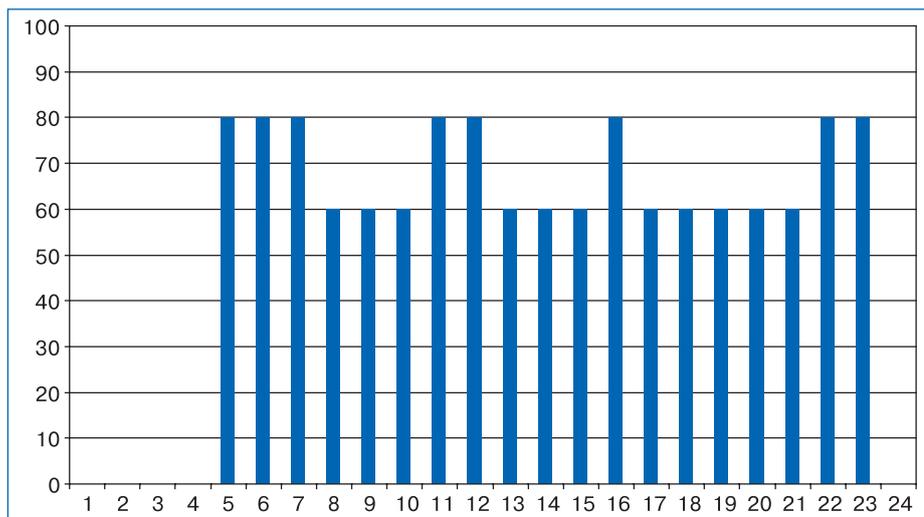
- Под значками кпд η , η_0 , η_1 , η_k понимается к.п.д. насосного агрегата $\eta_{на} = \eta_n * \eta_{дв}$ (рис. 6);

- $Q_0 = Q_{вср} \leftrightarrow (\eta = \max); H_0 = f(Q_0)$

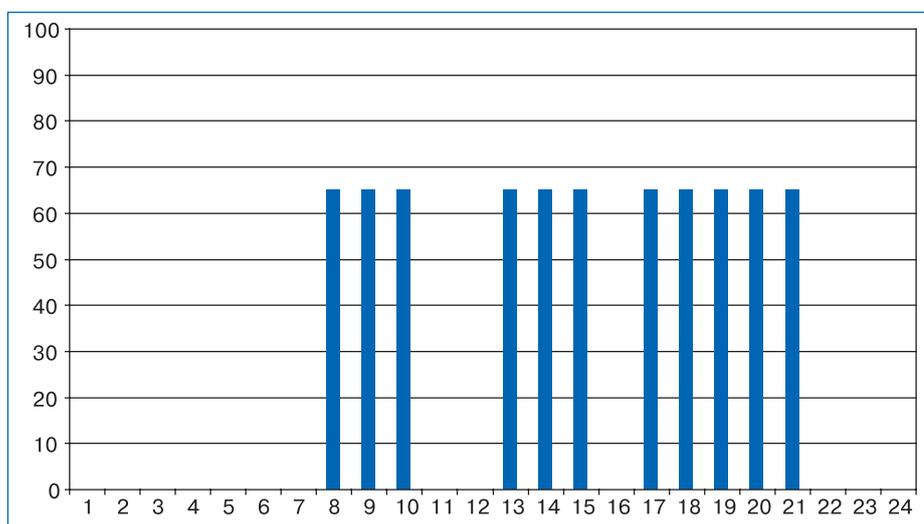
- $tg\beta$ и $tg\beta_1$ -показатель крутизны напорно-расходной характеристики Q-H насоса в энергоэффективном и рабочем диапазонах [3,7,8].



■ Рис. 3. Суточный график нагрузки насоса 2-й скважины



■ Рис. 4. Суточный график нагрузки насоса 3-й скважины



■ Таблица 2. Показатели технического уровня (высокой энергетической эффективности) скважинного электронасоса Grundfos SP125-3/MS6000

Q/Q ₀	0,7	0,75	1
K _{ev0}			3,9154
K _{eve}		3,2225	
K _{evr}	3,1189		
I _e		1,2150	1,0000
I _r	1,2554		

■ Таблица 3. Параметры профиля стандартизированной нагрузки Grundfos SP125-3/MS6000

Q/Q ₀	0,6	0,65	0,75	0,8	1
Q ₀ /Q	1,67	1,54	1,33	1,25	1
Q, м ³ /ч	74,4	80,6	93	99,2	124
H, м	74,91	73,11	70,33	67,85	60,31
η _x	0,573	0,591	0,616	0,626	0,644
N _x	26,42	27,12	28,86	29,23	31,67
N _x /N ₀	0,8342	0,8563	0,9113	0,9230	1
K _{evxi}	2,8160	2,9720	3,2225	3,3938	3,9154
K _{evxi} /K _{ev0}	0,7192	0,7590	0,8230	0,8668	1,0000
I _x	1,3904	1,3174	1,2150	1,1537	1,0000
I _e	1,2150	1,2150	1,2150	1,2150	1,2150
I _r	1,2554	1,2554	1,2554	1,2554	1,2554

$$I_x = \frac{K_{ev0}}{K_{evx}} = \frac{\eta_0}{\eta_x} \left(\frac{H_x Q_0}{Q_x H_0} \right).$$

Отличительной особенностью данного подхода от известного [1] является разделение напорно-расходной характеристики Q-H насоса на два глобальных участка: нерасчетных режимов и расчетных режимов, причем последний участок совпадает с рабочей зоной насоса, внутри которой выделяют локальную зону энергоэффективных режимов. Подобное разделение в лучшей степени соответствует текущему уровню развития восприятия персоналом, эксплуатирующим насосное оборудование тенденций дальнейшего совершенствования систем управления насосным оборудованием, в свете развития концепции «интернета вещей» (англ. - Internet of Things, IoT) - вычислительной сети физических предметов (устройств, оборудования), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой, исключаящими из части действий и операций необходимость участия человека.

Кроме того, при необходимости более детального анализа режимов нагрузки насосов, переход к «линейному» зонированию осуществляется достаточно простой «нарезкой» необходимого числа полос для конкретного стандартизованного профиля нагрузки и вычислением соответствующих им контрольных граничных индексов по методикам [7,8],

$$I_{xi} = \frac{K_{ev0}}{K_{ev1}} = \frac{\eta_0}{\eta_1} \left(1 + \frac{\Delta H}{H_0} \right) = \frac{\eta_0}{\eta_1} \left(1 + \frac{Q_0}{H_0} \text{tg}\beta_i (1-n) \right).$$

Соотношение индексов динамики изменения энергопотребления насоса I_e, I_r, I_x характеризует положение рабочей точки насоса, и системы водоподъема в определенной части напорно-расходной характеристики, как в зависимости от профиля нагрузки насоса, так и в зависимости от темпа роста гидравлических сопротивлений в скважинах [5] водозабора:

- критерий работы насоса в энергоэффективной части напорно-расходной характеристики

$$I_e > \sum \frac{\Delta t}{t} I_x > 1;$$

- критерий работы насоса за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики, но в пределах рабочей зоны установленной производителем

$$I_r > \sum \frac{\Delta t}{t} I_x > I_e;$$

- критерий работы насоса за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики, и за пределами рабочей зоны установ-



ленной производителем, т.е. работа насоса на нерасчетных режимах

$$\sum \frac{\Delta t}{t} I_x > I_r.$$

Выражение суммы текущих индексов динамики изменения энергопотребления в зависимости от режима изменения нагрузки

$$\sum \frac{\Delta t}{t} I_x$$

представляет собой ни что иное, как сумму нормированных средневзвешенных значений входных мощностей насоса при различных уровнях нагрузки² - **средневзвешенный индекс динамики изменения энергопотребления**

$$\begin{aligned} \bar{I}_x = \sum \frac{\Delta t}{t} I_x &= \frac{\Delta t_1}{t} I_{x,1} + \frac{\Delta t_2}{t} I_{x,2} + \frac{\Delta t_3}{t} I_{x,3} + \dots \\ &+ \frac{\Delta t_k}{t} I_{x,k} = \frac{\Delta t_1 N_1 Q_0}{t N_0 Q_1} + \frac{\Delta t_2 N_2 Q_0}{t N_0 Q_2} + \\ &+ \frac{\Delta t_3 N_3 Q_0}{t N_0 Q_3} + \dots + \frac{\Delta t_k N_k Q_0}{t N_0 Q_k} \quad (1) \end{aligned}$$

или известный индекс EEI [1], дополнительно нормированный по профилю подачи. Так, например, для варианта стандартизованного профиля нагрузки приведенного в [1], связь индекса с индексом EEI следующая:

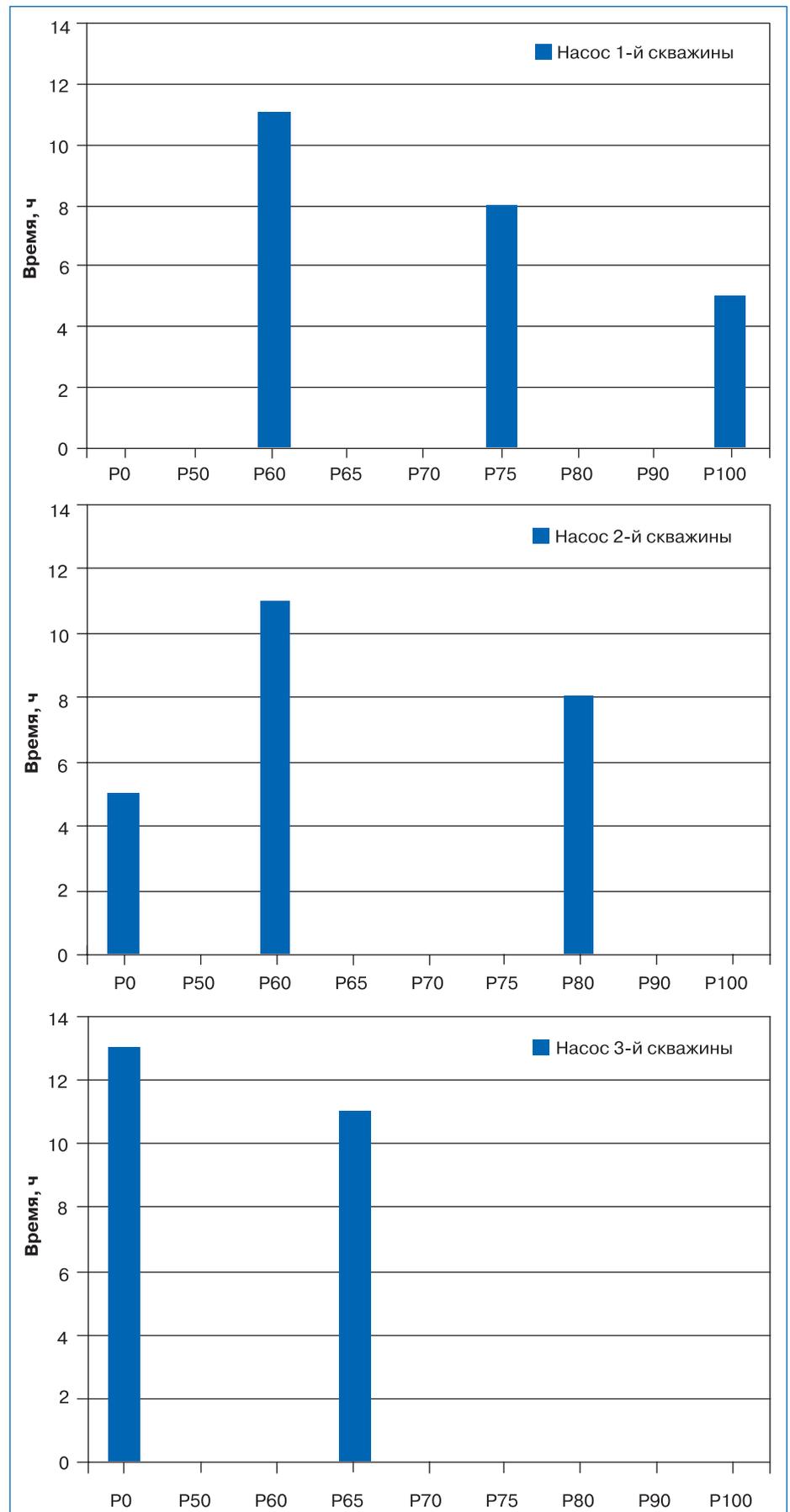
$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= \frac{\Delta t_1 N_{100\%}}{t N^0} \cdot 1 + \frac{\Delta t_2 N_{75\%}}{t N^0} \cdot \frac{4}{3} + \\ &+ \frac{\Delta t_3 N_{50\%}}{t N^0} \cdot 2 + \frac{\Delta t_4 N_{25\%}}{t N^0} \cdot 4 \\ EEI &= \frac{1}{N_0} * \left(\frac{\Delta t_1}{t} N_{100\%} + \frac{\Delta t_2}{t} N_{75\%} + \right. \\ &\left. + \frac{\Delta t_3}{t} N_{50\%} + \frac{\Delta t_4}{t} N_{25\%} \right) \end{aligned}$$

- вычисление может производиться как для каждого из насосов в скважине, так и для группы насосов во всех скважинах.

Учитывая, что нагрузка $N_{25\%}$ является неэкономичной для скважинных насосов и находится, как правило, за пределами рабочей зоны насоса, рассмотрим в качестве стандартного текущий профиль нагрузки водозабора для суточного цикла (рис. 5). Связь индекса \bar{I}_x с индексом EEI для этого профиля следующая:

$$\begin{aligned} \bar{I}_x &= \frac{\Delta t_1 N_{100\%}}{t N^0} \cdot 1 + \frac{\Delta t_2 N_{80\%}}{t N^0} \cdot \frac{5}{4} + \\ &+ \frac{\Delta t_3 N_{75\%}}{t N^0} \cdot \frac{4}{3} + \frac{\Delta t_4 N_{65\%}}{t N^0} \cdot \frac{20}{13} + \\ &+ \frac{\Delta t_5 N_{60\%}}{t N^0} \cdot \frac{5}{3} \\ EEI &= \frac{1}{N_0} * \left(\frac{\Delta t_1}{t} N_{100\%} + \frac{\Delta t_2}{t} N_{80\%} + \right. \\ &\left. + \frac{\Delta t_3}{t} N_{75\%} + \frac{\Delta t_4}{t} N_{65\%} + \frac{\Delta t_5}{t} N_{60\%} \right) \end{aligned}$$

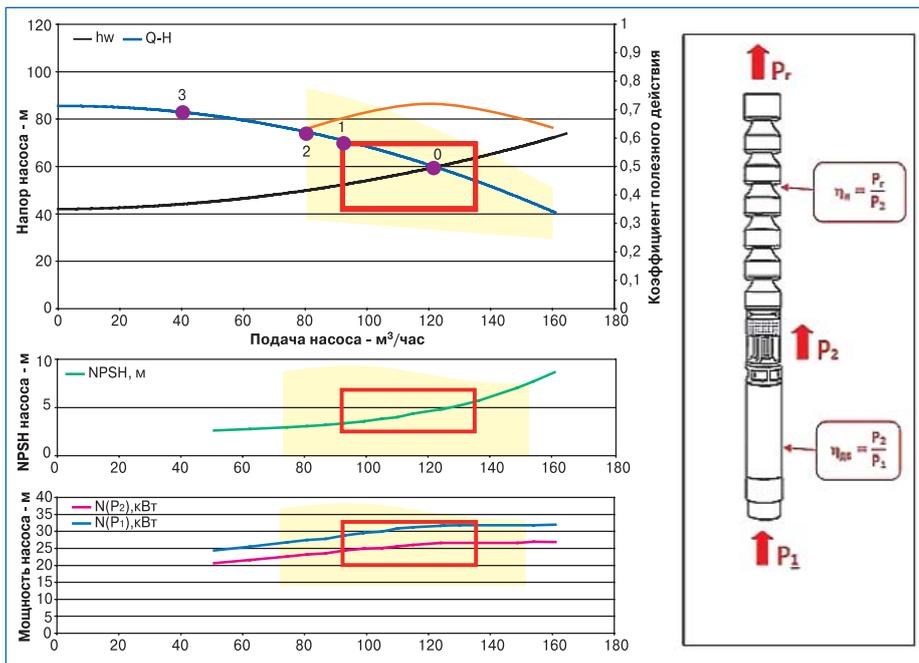
■ Рис. 5. Профили стандартизованной нагрузки насосов в зависимости от точного графика водопотребления



² Текущие значения мощности N_i соответствует мощности P_i (рис. 6) при нагрузке; эталонная мощность N_0 соответствует мощности P_0 (рис. 6) при нагрузке $Q_0 = Q_{\text{вср}} \leftrightarrow (\eta = \max)$. Под временем t понимается сумма периодов включения насоса за сутки (расчетный цикл).



Рис. 6. Укрупненное «глобальное» зонирование напорно-расходной характеристики Q-H насоса



- вычисление может производиться как для каждого из насосов в скважине, так и для группы насосов во всех трех скважинах.

Для рассматриваемого примера рис. 1, 2, 3, 4, 5 и примененных насосов марки Grundfos SP125-3-17A01903 с электродвигателями MS6000, соотношения индексов динамики изменения энергопотребления насоса I_e, I_r, I_x имеют следующий вид;

- критерий работы насоса в энергоэффективной части напорно-расходной характеристики $1,2150 > \bar{I}_x > 1$;

- критерий работы насоса за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики, но в пределах рабочей зоны установленной производителем $1,2554 > \bar{I}_x > 1,2150$;

- критерий работы насоса за пределами энергоэффективной части напорно-расходной характеристики, и за пределами рабочей зоны установленной производителем, т.е. работа насоса на нерасчетных режимах $\bar{I}_x > 1,2554$.

Таблица 4. Индексы энергоэффективности центробежных погружных насосов группового скважинного водозабора при переменном профиле нагрузки

	нагрузка 0%	60%	65%	75%	80%	100%	итого
1 скважина/время работы, ч.	0	11	0	8	0	5	24
\bar{I}_x	-	0,6373	0,0000	0,4050	0,0000	0,2083	1,2506
EEl, %	-	38,24	0,00	30,38	0,00	20,83	89,44
2 скважина/время работы, ч.	5	11	0	0	8	0	19
\bar{I}_x	-	0,8050	0	0	0,4858	0	1,2907
EEl, %	-	48,30	0,00	0,00	38,86	0,00	87,16
3 скважина/время работы, ч.	13	0	11	0	0	0	11
\bar{I}_x	-	0	1,3174	0	0	0	1,3174
EEl, %	-	0,00	85,63	0,00	0,00	0,00	85,63
водозабор в целом/время работы, ч.	18	22	11	8	8	5	54
\bar{I}_x	-	0,5665	0,2684	0,1800	0,1709	0,0926	1,2783
EEl, %	-	33,99	17,44	13,50	13,67	9,26	87,86

Таблица 5. Дополнительные показатели энергоэффективной эксплуатации группового скважинного водозабора при переменном профиле нагрузки

	60%	65%	75%	80%	100%	итого
Анализ текущих подач насосов водозабора						
в энергоэффективном диапазоне, ч.	0	0	8	8	5	39%
в рабочем диапазоне, ч.	0	0	8	8	5	39%
на нерасчетных режимах, ч.	22	11	0	0	0	61%
Доля подач повышенного риска потерь в результате возможных отказов насосов						
1 скважина, %	45,83%	0	-	-	-	45,83%
2 скважина, %	57,89%	0	-	-	-	57,89%
3 скважина, %	0	100,00%	-	-	-	100,00%
водозабор, %	21,13%	20,37%	-	-	-	41,50%
недостаток до номинальной мощности насосов, %	6,75%	2,93%	1,31%	1,14%	0,00%	12,14%
недостаток до номинальной подачи насосов, %	16,30%	7,13%	3,70%	2,96%	0,00%	30,09%
средневзвешенная потеря подачи на отклонение от номинальной мощности, %/%	1,08	0,55	0,46	0,42		2,51
Суточный простой 1 скважины, %	0%					
Суточный простой 2 скважины, %	21%					
Суточный простой 3 скважины, %	54%					
Суточный простой водозабора, %	25%					



В таблицах 1 и 2 приведены показатели технического уровня скважинного насоса Grundfos SP125-3-17A01903 с электродвигателем MS6000.

Значения индексов I_e и I_r в таблице 2 являются контрольными и соответствуют границам энергоэффективного и рабочего диапазонов насоса.

Необходимые промежуточные переменные для вычисления текущих индексов нагрузки по приведенным выше формулам (1) указаны в таблице 3.

В таблице 4 приведены индексы энергоэффективности (EEI)³, текущие индексы I_x режимов суточной загрузки насосов в каждой из скважин и средневзвешенные индексы \bar{I}_x динамики изменения энергопотребления в каждой из скважин, и водозабора в целом, в зависимости от фактического профиля стандартизированной нагрузки насосов (рис. 5).

Для насоса 1 скважины

$$\bar{I}_x = \sum \frac{\Delta t}{t} I_x = \frac{5}{24} I_{x,100} + \frac{0}{24} I_{x,80} + \frac{8}{24} I_{x,75} + \frac{0}{24} I_{x,65} + \frac{11}{24} I_{x,60} = 1,2506$$

Для насоса 2 скважины

$$\bar{I}_x = \sum \frac{\Delta t}{t} I_x = \frac{0}{19} I_{x,100} + \frac{8}{19} I_{x,80} + \frac{0}{19} I_{x,75} + \frac{0}{19} I_{x,65} + \frac{11}{19} I_{x,60} = 1,2907$$

Для насоса 3 скважины

$$\bar{I}_x = \sum \frac{\Delta t}{t} I_x = \frac{0}{11} I_{x,100} + \frac{0}{11} I_{x,80} + \frac{0}{11} I_{x,75} + \frac{11}{11} I_{x,65} + \frac{0}{11} I_{x,60} = 1,3174$$

Для всех трех насосов водозабора

$$\bar{I}_x = \sum \frac{\Delta t}{t} I_x = \frac{5}{54} I_{x,100} + \frac{8}{54} I_{x,80} + \frac{8}{54} I_{x,75} + \frac{11}{54} I_{x,65} + \frac{11}{54} I_{x,60} = 1,2783$$

Энергоэффективность работы группового скважинного водозабора складывается из энергоэффективной работы отдельных скважин, входящих в его состав, каждая из которых проверяется на соблюдение условий работы насосов в энергоэффективном диапазоне подач и напоров [7].

На практике необходимым условием будет являться как минимум контроль энергопотребления насоса, расхода (объема) поднятой воды, давления и их временного распределения на устье каждой из скважин и суммарного расхода (объема) поступившей воды в сборный резервуар за рассматриваемый временной промежуток.

Рассмотрение таблицы 4 показывает, что, несмотря на высокий уровень загрузки насосов водозабора EEI = 85-89%, два насоса из трех работают за пределами рабочего диапазона, рекомендованного производителем, и имеют высокий риск аварийности

вследствие выхода из строя и поломки комплектующих. Первый насос значительную часть времени работает в энергоэффективном режиме, поэтому значение **средневзвешенного индекса динамики изменения энергопотребления** не выходит за пределы рабочего диапазона. Данный пример наглядно демонстрирует **большую информативность индекса \bar{I}_x для анализа условий работы насосов по сравнению с индексом EEI**.

Работа насосов на нерасчетных режимах (за пределами указанных выше диапазонов) является одним из существенных факторов, объясняющих расхождение между задекларированным производителем сроком эксплуатации насоса (до 10 лет) и фактическим (от нескольких месяцев до 2-6 лет) в реальных условиях [6]. Такая работа зачастую завершается поломкой, отказом или прекращением эксплуатации насоса.

Из данных таблицы 5 следует, что 61% рабочего времени насосы водозабора функционируют на нерасчетных режимах, и на это время приходится 41,5% от общей производительности водозабора.

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 энергоэффективной эксплуатации в однотипных скважинах [7, 8], достигающую 167% у лучших моделей по сравнению с худшими, только за счет более крутопадающих Q-H характеристик и характеризуются большим запасом напора в энергоэффективном диапазоне насоса, более крутым подъемом левой ветви графика

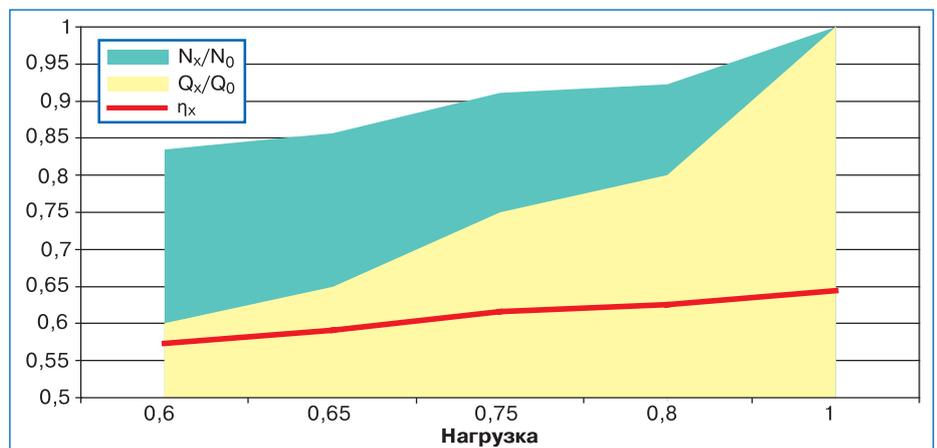
к.п.д. и расширенным «плато участком в зоне максимальных к.п.д.», что приводит к трансформации «домика к.п.д.» скорее в «трапецию к.п.д.», являющуюся более предпочтительной для скважинных центробежных насосов для достижения высокой энергетической эффективности, исходя из особенностей их эксплуатации в природных объектах-скважинах.

Дополнительным показателем такого энергетического качества насоса, зависящим от перечисленных выше факторов, является отношение средневзвешенной потери подачи на отклонение от номинальной мощности (таблица 5) - **при сравнении насосов разных производителей на однотипной нагрузке, чем меньше этот показатель, тем выше энергетическое качество насоса**.

Сближение кривых падения мощности и падения подачи (уменьшение заштрихованной области) в указанном на рис. 7 профиле нагрузки для скважинных погружных центробежных насосов отличает насосы высокой энергетической эффективности, т.к. обеспечивается незначительное снижение коэффициента энергоэффективности водоподъема [4] на указанном профиле нагрузки - это является задачей адаптации конструкций насосов к требованиям практики для производителей скважинного насосного оборудования.

Дополнительный известный неиспользуемый резерв повышения энергоэффективности [9,10,11] скважинных насосов за счет изменения схемы водоподъема на беструбную установку - PSWR - system (англ. -The pumping system without the riser pipes) [4] может дать повышение коэффициента энергоэффективности водоподъема [4, 7, 8] и снижение ежегодно от 4 до 36 тонн выбросов парниковых газов на скважину с центробежным погружным насосом.

■ **Рис. 7.** Кривые падения мощности, подачи и к.п.д. насоса Grundfos SP125-3-17A01903/MS6000 в зависимости от нагрузки



³ EEI (индекс энергоэффективности) определяет потребление энергии по отношению к гидравлическому выходу. При вычислении EEI также учитываются переменные требования при частичной нагрузке. В данном случае EEI рассматривается, как мера отклонения от номинальной мощности насоса - N_0 .

**Выводы:**

1. Показатели технического уровня центробежных скважинных многоступенчатых насосов с погружным электродвигателем, отражаемые в рекламно-информационных каталогах, требуют упорядочивания и систематизации, исходя из требований действующих нормативно-правовых документов по энергоэффективности и энергосбережению. Потребители насосного оборудования еще до приобретения, а проектировщики на стадии расчетов должны иметь возможность проводить вариантное сравнение насосов различных производителей по стандартной системе показателей, как например, в приведенных выше таблицах 1 и 2.

2. Действующие строительные нормы и правила (СНиП) не отражают современных требований [13] по оптимизации проектирования групповых скважинных водозаборов подземных вод и энергоэффективного проектирования и эксплуатации насосного оборудования совместно со скважинами, несмотря на имевшиеся необходимые проработки [1, 2, 12] и нуждаются в дополнении.

3. Планируемые к принятию нормативные документы (ГОСТ) по адаптации международных стандартов (индекс энергоэффективности EEI) при всей их прогрессивности означают передачу инициативы европейской законодательной практике, несмотря на возможность формирования собственного правового поля по структурированию и оздоровлению рынка ЕвразЭС. Приведенные примеры показывают более высокую **информативность индекса \bar{I}_x для анализа условий работы насосов по сравнению с индексом EEI**.

4. Оценка энергоэффективной эксплуатации группового скважинного водозабора в целом заключается в установлении соответствия между недостатком до номинальной подачи насосов и недостатком до номинальной мощности насосов. Энергоэффективность работы группового скважинного водозабора складывается из энерго-

эффективной работы отдельных скважин, входящих в его состав, каждая из которых проверяется на соблюдение условий работы насосов в энергоэффективном диапазоне подач и напоров [7] путем вычисления необходимых индексов.

5. По определенным при эксплуатации насоса текущим циклическим значениям водоподдачи, энергопотребления и давления на устье скважины достаточно просто можно рассчитывать текущие нормированные средневзвешенные значения входных мощностей насосов [4, 7], индексов энергоэффективности (типа EEI, \bar{I}_x) и других показателей высокой энергетической эффективности, причем производитель насосного оборудования способен и могут оснащать станции управления насосными агрегатами соответствующими контроллерами, производящими указанные выше вычисления, индикацию прошедших и текущих параметров энергоэффективности и передачу информации в систему управления работой водозабора, т.е. наиболее дальновидным производителям скважинного насосного оборудования необходимо сделать реальные шаги в направлении осуществления технологии интернета вещей IoT и получить в перспективе необходимые конкурентные преимущества в продажах и продвижении такого насосного оборудования на внешних рынках.

Литература:

1. Sebastian Lang, Gerhard Ludwig, Peter F. Pelz and Bernd Stoffel, General Methodologies of Determining the Energy-Efficiency-Index of Pump Units in the Frame of the Extended Product Approach//Proceedings of the 8th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS), Paper No. 122, October 28th - 30th, 2013, Rio de Janeiro, Brazil;
2. Плотников Н.А., Алексеев В.С., Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. - М.: Стройиздат, 1990. - 256с.;
3. 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. Импорт-

тозамещение и локализация производства в России» - 26 октября 2016г., Москва, Изд. МВЦ «Крокус-Экспо»-2016, с. 48-61.

4. Фисенко В.Н., Энергосбережение при эксплуатации скважинных водозаборов подземных вод// Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 11. С. 22-33.

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., Жизненный цикл погружных центробежных насосов в водозаборных скважинах // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 7. С. 54-63.

7. 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.

8. 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.

9. 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/record/01000016527>.

10. 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>.

11. 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

12. ПОСОБИЕ по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84) //ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР, М., Стройиздат, 1989 - 272с.

13. ГуриновичА.Д., Сычева Е.А., Оптимизация параметров и режимов работы скважинных водозаборов подземных вод// Вода Magazine. 2017. № 5. С. 30-35.

Indices of energy efficiency of a group of submersible centrifugal pumps operating with a variable load profile in water wells

The quantitative assessment of energy efficiency of a group of pumping units of a borehole water intake of groundwater is based on an assessment of the energy-efficient operation of individual wells that are part of it. Calculated or experimentally-determined normalized weighted average values of the input powers of pumps operating at different operating points of the standard load profile, with a «linear» zoning of the pressure-flow characteristic of the Q-H pump, it is possible to calculate known energy efficiency indices (EEI).

With the enlarged «global» zoning of the pressure-flow characteristic Q-H, the control and current indices of the dynamics of the pump power consumption, corresponding to the changing non-standard load profile, allow us to calculate the same energy efficiency indexes (EEI) using a different methodology and a group of additional, auxiliary indices characterizing the energy efficiency of individual Pumps and a group of pumps in general.

The relationship between the energy efficiency index (EEI) and the index of changes in the energy consumption of the pump (\bar{I}_x), is shown, examples are given.

Key words: centrifugal multistage submersible pump, well water intake, pump working cycle, energy-efficient pump cycle, pump load profile, energy-efficient indexes, Internet of things, control parameters of well water pumps.

Fisenco 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.