

УДК 681.5

Баландин М.С. (аспирант)

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент кафедры

кибернетических систем Соловьев И.Г.

Тюменский индустриальный университет

МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛА НАРАБОТКИ ЭЦН НА ОСНОВЕ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ В СБОРКЕ

Аннотация

Разработка трудноизвлекаемых запасов и малодебитных скважин привела к широкому использованию электроцентробежных насосов (ЭЦН) с производительностью от 10 до 30 м³/сут. Современные инженерные решения в области проектирования малодебитных ступеней позволили добиться значений коэффициента полезного действия (КПД), сопоставимых с КПД высокопроизводительных ступеней. Однако ступени с малой производительностью конструктивно ограничены по создаваемому напору и не могут обеспечить те же уровни подпоров, что и мощные. Поэтому для достижения больших напоров требуется большее число ступеней, что влечет за собой рост длины, массы ЭЦН, а также негативно сказывается на потенциальном ресурсе системы.

Ключевые слова

Скважина, насос, ступень, подача, напор, наработка, модель.

Введение. Нефтяная отрасль всё чаще сталкивается с необходимостью вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов [1], в том числе малодебитных скважин, характеризующихся низким уровнем притока пластового флюида. В связи с этим широкое распространение получили ЭЦН, предназначенные для работы в условиях низкого дебита (от 10 до 30 м³/сут).

Современные скважинные насосы являются многоступенчатыми машинами. Ступень ЭЦН состоит из рабочего колеса и направляющего аппарата. Ступени собраны в секции, причем, подвижная их часть – рабочие колеса, жестко зафиксированы на валу насоса, а неподвижная – направляющие аппараты, собрана в единый корпусной узел. Последовательное соединение секций с помощью муфт формирует итоговую сборку ЭЦН.

Анализ каталогов производителей показывает, что в рамках одной габаритной группы серийных ЭЦН ступени с меньшей подачей, как правило, развивают меньший напор. Это обусловлено как гидродинамическими характеристиками проточной части, так и ограничениями, связанными с геометрией рабочих колес [2]. В результате, для создания высоких напоров малodeбитных ступеней потребуется значительно больше. При этом, число ступеней в сборках ЭЦН ограничено и варьируется в среднем от 300 до 600. Установка большего числа ступеней вызывает дополнительные трудности: рост общей длины сборки, увеличение массы, ухудшение условий охлаждения, повышение уровня вибраций, увеличение нагрузки на подшипники [3]. В некоторых случаях использование малodeбитных ЭЦН не представляется возможным без уменьшения глубины подвески, что в свою очередь приведет к снижению потенциала производительности скважины [4].

С точки зрения теории надежности, система с последовательным соединением большого числа элементов характеризуется пониженной общей надежностью, поскольку увеличивается количество потенциальных точек отказа. При рассмотрении числа ступеней как интегрального показателя сложности и длины сборки, влияющего на нагрузку на узлы, применительно к ЭЦН это будет означать, что увеличение числа рабочих ступеней и секций потенциально снижает надежность сборки в целом. Следовательно, подбирая насос для одной и той же скважины, потенциальная наработка на отказ малodeбитного ЭЦН будет ниже, чем высокопроизводительного, требующего меньшее число ступеней и секций для достижения аналогичного напора [5].

Модель. Для анализа влияния производительности ЭЦН и числа ступеней в сборке насоса на потенциальную наработку вводится математическая зависимость наработки T от числа ступеней n . Поскольку изначальное значение наработки на отказ T не доступно в открытых источниках и может варьироваться в зависимости от производителя вводится относительная наработка на отказ δT :

$$\delta T = \begin{cases} 1, & n \leq n_{\min} \\ \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}, & n_{\min} < n < n_{\max} \\ 0, & n \geq n_{\max} \end{cases}$$

Зависимость строится на основе следующих допущений, необходимых для оценки наработки:

1. Все ступени ЭЦН считаются равнонадежными – вероятность отказа одинакова для каждой из них.

2. Напор, создаваемый одной ступенью Δh^0 , зависит от её производительности q^0 и увеличивается по мере роста подачи:

$$\Delta h^0 = \alpha_{h0} + a_{h1} q^0$$

Значения α_{h0} и α_{h1} выбраны на основе анализа характеристик серийных ЭЦН (рис. 1) [10].

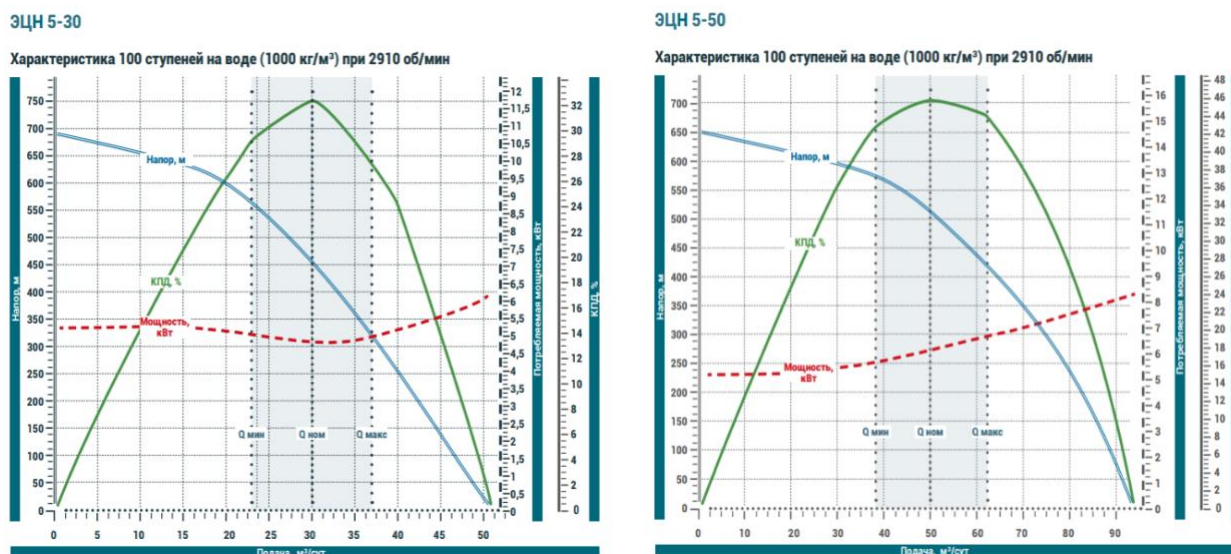


Рис. 1. Сравнение характеристик ЭЦН с подачей 30 м³/сут и 50 м³/сут

Число ступеней, необходимое для создания суммарного напора h^0 , округляется до ближайшего целого значения:

$$n = \frac{h^0}{\Delta h^0}$$

3. Если число ступеней не превышает $n_{\min}$ – ущерб потенциала наработки отсутствует.

4. Эксплуатация ЭЦН с числом ступеней больше $n_{\max}$ считается нецелесообразной ввиду малого времени наработки.

Значения $n_{\min}$, $n_{\max}$ выбраны по таблицам комплектации наиболее востребованных напоров ЭЦН и отражают типичный диапазон эксплуатации. Максимальное значение ступеней в сборке $n_{\max}$ ограничивается потребляемой мощностью насоса, которая при большем числе ступеней в сборке превышает предельную передаваемую мощность вала заданной прочности (красная зона на рис. 2) [7].

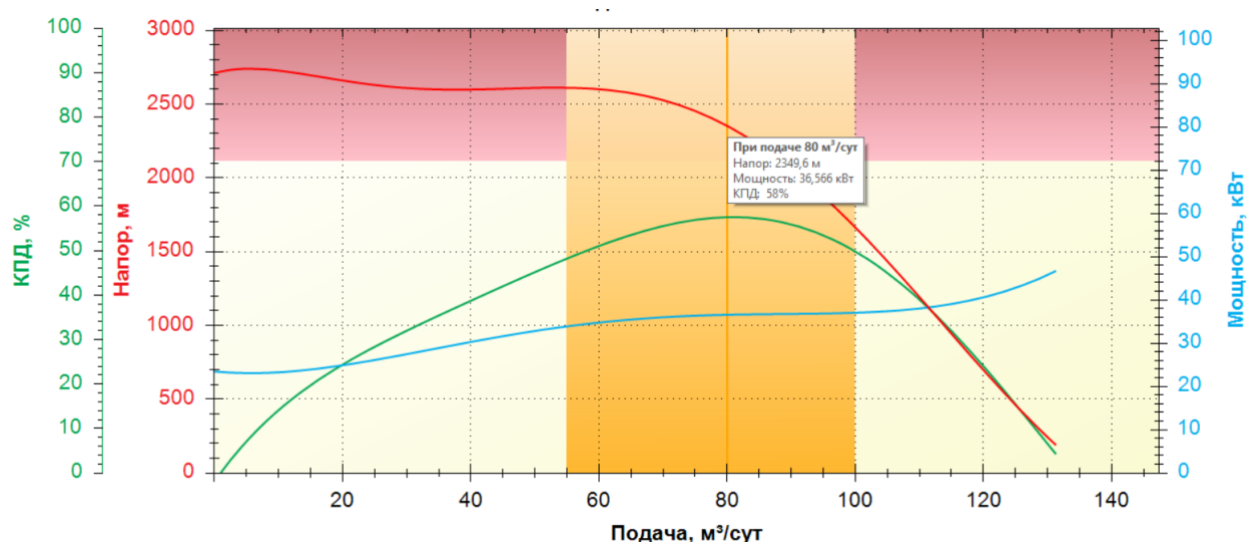


Рис. 2. Характеристика ЭЦН с подачей 80 м³/сут с выделенной зоной предельной потребляемой мощности насоса

Таблица 1

Параметры модели относительной наработки на отказ

Параметр	$n_{\min}$	$n_{\max}$	α_{h0}	α_{h1}
Значение	300	600	2,22	0,07
Ед. измерения	ед.			

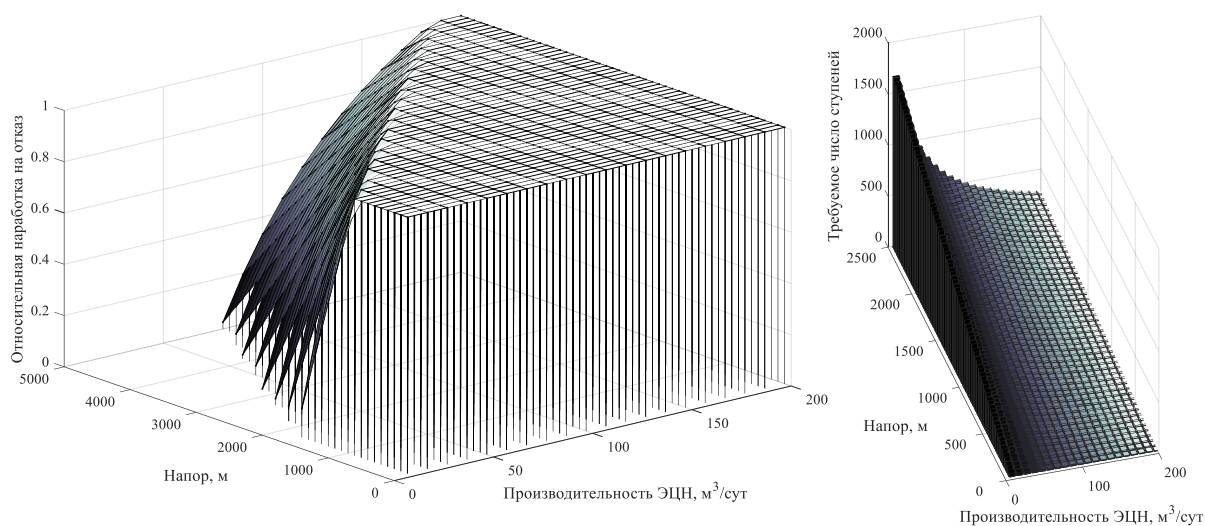


Рис. 3. Графическое представление модели относительной наработки на отказ

При необходимости параметры модели могут быть уточнены на базе данных промысловой эксплуатации.

Анализ. Рассмотрим работу модели на примере подбора ЭЦН для скважины с параметрами из табл. 2 в условиях непрерывной эксплуатации.

Таблица 2

Начальные параметры модели скважины

Наименование	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Линейное давление	p_L	1,5	МПа
Пластовое давление	p_R	13	
Глубина забоя	H_R	2000	м

Уровень подвески	H_N	1400	
Обводненность	β	0,7	ед.
Коэффициент продуктивности	w_R	6,1	
Гидросопротивление НКТ	r_N	3,4	сут./м ²
Гидросопротивление устьевого штуцера	r_U	3	

Потенциал производительности скважины $q_h=28$ м³/сут, что позволяет отнести ее к малodeбитному фонду. Перебирая номиналы производительности ЭЦН q^0 , напор h рассчитывается таким образом, чтобы реальная производительность ЭЦН соответствовала потенциалу производительности q_h скважины:

$$h = (r_U + r_N)q_h + H_N - h^{LM},$$

где $h^{LM}=100$ [м] – минимальный динамический уровень жидкой фазы над приёмом насоса.

Таблица 3

Результаты моделирования при потенциале скважины ≈ 28 м³/сут

Номинал производительности ЭЦН	Номинальный напор ЭЦН	Напор одной ступени	Количество ступеней	Относительная наработка на отказ
20	2490	3,8	659	-
30	1382	4,5	304	0,98
40	1131	5,3	213	1
50	1077	6,1	177	1

60	1058	6,9	154	1
70	1046	7,7	137	1
80	1036	8,4	123	1
90	1029	9,2	112	1
100	1024	10	103	1

Из табл. 3 следует, что ЭЦН, производительность которого ближе к потенциальной производительности скважины, имеет относительную наработку меньше, чем насосы с производительностью выше. Значение «-» в столбце «относительная наработка на отказ» означает, что $\delta T=0$ и эксплуатация нецелесообразна.

Увеличим пластовое давление p_R до 18 МПа, что обеспечивает потенциал производительности $q_h=58 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Таблица 4

Результаты моделирования при потенциале скважины $\approx 58 \text{ м}^3/\text{сут}$

Номинал производительност и ЭЦН	Номинальны й напор ЭЦН	Напор одной ступен и	Количество о ступеней	Относительна я наработка на отказ
40	3009	5,3	565	0,12
50	1960	6,1	321	0,93
60	1590	6,9	231	1
70	1402	7,7	183	1
80	1287	8,4	153	1
90	1223	9,2	133	1
100	1209	10	121	1

Вновь насос с незначительно меньшей производительностью имеет относительную наработку ниже, чем более производительные машины (табл. 4).

Теперь увеличим глубину подвески H_N до 1800 м. На таком уровне потенциал производительности скважины $q_h=82$ м³/сут и максимальной относительной наработкой обладают высокопроизводительные машины (табл. 5).

Таблица 5

Результаты моделирования при потенциале скважины ≈ 82 м³/сут

Номинал производительности и ЭЦН	Номинальный напор ЭЦН	Напор одной ступени и	Количество ступеней	Относительная наработка на отказ
50	6252	6,1	1024	-
60	3546	6,9	515	0,28
70	2708	7,7	354	0,82
80	2301	8,4	273	1
90	2060	9,2	224	1
100	1900	10	190	1

Обсуждение. Расчеты подтверждают, что с увеличением производительности ступени положительно сказывается на потенциальной наработке установки, поскольку уменьшается требуемое число ступеней для достижения заданного напора. Особенно ярко эффект выражается при переходе производительности от 20-40 м³/сут к 70-100 м³/сут, где необходимое число ступеней в высокопроизводительных сборках снижается более чем в два раза.

Тем не менее, чрезмерное превышение производительности над потенциалом скважины приводит к тому, что рабочая точка ЭЦН выходит из пределов рабочей зоны. Это приводит к росту вибраций, ухудшению охлаждения двигателя и, как следствие, к снижению общей эффективности установки. Кроме того, в условиях нестабильного притока возрастает риск возникновения аварийных режимов.

При выборе параметров обустройства скважины необходимо учитывать не только число ступеней в сборке насоса, но и соответствие реальной производительности номинальной.

Заключение. Разработанная модель оценки потенциала наработки ЭЦН позволяет учитывать влияние производительности ступеней и их количество на надежность установки. На примере подбора ЭЦН показано преимущество высокодебитных насосов над малодебитными в отношении относительной наработки на отказ. При этом важно отметить, что данная модель создана лишь для оценки потенциальной наработки и не учитывает влияние эксплуатационных факторов. Для осуществления оптимального подбора параметров ЭЦН требуется подключение модели динамики освоения эксплуатационного ресурса.

Литература

1. Шахвердиев, А. Х. Проблемы трансформации запасов углеводородного сырья в нерентабельную техногенную категорию трудноизвлекаемых / А. Х. Шахвердиев, С. В. Арефьев, А. В. Давыдов // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 4. – С. 38-43.
2. Долов, Т. Р. Влияние качества изготовления ступеней электроцентробежных насосов на их энергетические характеристики / Т. Р. Долов, Ю. А. Донской // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2019. – № 5(113). – С. 16-19.
3. Островский, В. Г. Исследования процесса изнашивающего воздействия частиц механических примесей на узлы электроцентробежных насосов / В.

- Г. Островский, Д. И. Шишлянников, С. В. Воробель // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2019. – № 3(111). – С. 12-16.
4. Шабонас, А. Р. Оптимизация работы электроцентробежного насоса для повышения наработки на отказ / А. Р. Шабонас // Нефтепромышленное дело. – 2021. – № 8(632). – С. 30-36.
5. Абзалов, А. В. Анализ причин отказов и разработка мероприятий по совершенствованию работы скважин Черногорского месторождения, оборудованных центробежными насосами / А. В. Абзалов, О. В. Савенок // Научный потенциал вуза – производству и образованию : Сборник статей по материалам III Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию Победы советского народа в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг., Армавир, 04–05 декабря 2020 года. – Армавир: ООО «Редакция газеты «Армавирский собеседник» (Армавирская типография), 2021. – С. 52-61.