

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА НАСОСОВ

А. С. Галеев¹, Б. З. Султанов¹, Р. Н. Сулейманов¹, С. Г. Каминский²

(Уфимский государственный нефтяной технический университет¹,
ООО "Татнефть-РЭТО"²)

Работа насосов по перекачке жидкости неизбежно сопровождается большими потерями мощности [1], доходящими в конце межремонтного периода (МРП), по нашим данным, до 50 % и более [2]. Насколько допустимо снижение КПД работающих насосов в процессе эксплуатации? Этот вопрос должен быть поставлен в повестку дня служб ОГМ и ОГЭ, так как сегодня высокие мощности сочетаются с ростом отпускных цен на электроэнергию. Последнее дает основания предполагать, что принятая ранее за аксиому политика достижения больших значений МРП, не учитывающая естественное снижение КПД агрегатов в процессе длительной работы, должна быть пересмотрена. А именно, план ППР (планово-предупредительные ремонты), имеющий целью поддержание рабочего состояния агрегатов, должен быть реализован с точки зрения оценки КПД работающих агрегатов и принятия решения о дальнейшей эксплуатации только в случае достаточного его значения [3, 4]. В противном случае агрегат должен быть остановлен и демонтирован, так как восстановление гидравлического КПД возможно только в результате капитального ремонта насоса [5]. В качестве примера подхода к этому вопросу можно указать на работу [6], где предложено (без приведения расчета) не допускать снижения к. п. д. насосов магистральных нефтепроводов более чем на 3 %. Очевидно, что конкретное значение этой величины зависит от установленной мощности насоса, отпускных цен на электроэнергию, стоимости капитального ремонта и темпа падения к. п. д. насоса во времени. Изменение вышеперечисленных факторов в зависимости от конкретной экономической ситуации постулирует необходимость выведения не числового предела допустимого снижения к. п. д., а получения функциональной связи между ними.

Оценку времени проведения предупредительного капитального ремонта насоса, имеющего целью восстановление гидравлического КПД после достижения некоторого критического значения, можно выполнить на основании следующих показателей работы насоса:

P – перепад давления на насосе, МПа,

Q – расход закачиваемой жидкости, м³/час,

$T_{\text{МРП}}$ – среднее значение МРП, установившееся на данном предприятии, сутки,

k_0 – начальный гидравлический КПД насоса, - нового или после капитального ремонта, %,

$k_{\text{МРП}}$ – конечный гидравлический КПД насоса в момент времени $T_{\text{МРП}}$, %,

$C_{\text{рем.}}$ – стоимость капитального ремонта, включая стоимость вспомогательных работ (демонтаж, перевозка, монтаж, и др.), рубли,

$C_{\text{тариф}}$ – стоимость одного киловатт-часа электроэнергии.

Гидравлический КПД насоса монотонно убывает по мере износа насоса. Будем считать, что КПД уменьшается линейно от времени работы

$$k(t) = k_0 - (k_0 - k_{\text{МРП}}) * T / T_{\text{МРП}} = k_0 - (\Delta k / T_{\text{МРП}}) * T = k_0 - k_1 * T, \quad (1)$$

где T - текущее время (сут), а $k_1 = \Delta k / T_{\text{МРП}}$ - темп падения КПД насоса в течении $T_{\text{МРП}}$ ($\Delta k = k_0 - k_{\text{МРП}}$).

Полезная гидравлическая мощность определяется напором и расходом

$$W_{\text{гидр.}} = P * Q. \quad (2)$$

Потребляемая электрическая мощность составит

$$W_{\text{потр.}} = W_{\text{гидр.}} / (\text{КПД}_{\text{мех.насоса}} * \text{КПД}_{\text{дв}} * k(t)) = W/k(t), \quad (3)$$

где $\text{КПД}_{\text{мех.насоса}}$, $\text{КПД}_{\text{дв}}$ – соответственно, коэффициенты полезного действия насоса (механический, учитывающий потери на трение в подшипниках и сальниках, принимается равным 0.98) и двигателя (по паспортным данным, лежит в пределах от 93-98 %).

Тогда среднее значение расходов на электроэнергию и капитальный ремонт насосов (за время T), будет равно:

$$C_{\text{средн}}^0 = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\left(\frac{C_{\text{рем.}}}{T_{\text{МРП}}} \right) + C_{\text{тариф}} \frac{W}{k_0} \right] dt = \frac{C_{\text{рем.}}}{T_{\text{МРП}}} + \frac{C_{\text{тариф}} W}{k_0}$$

для случая неизменного в течение межремонтного периода КПД k_0 , и

$$C_{\text{средн}}^k = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\left(\frac{C_{\text{рем.}}}{T} \right) + C_{\text{тариф}} \frac{W}{k(t)} \right] dt = \frac{C_{\text{рем.}}}{T} - \frac{1}{T} \left(\frac{C_{\text{тариф}} W}{k_1} \ln \left(1 - \frac{k_1}{k_0} T \right) \right),$$

для линейно убывающего со временем КПД $k(t)$, - см. формулу (1).

Приведенное значение расходов составит

$$\begin{aligned} \frac{C_{\text{средн}}^k}{C_{\text{средн}}^0} &= \frac{1 - \frac{C_{\text{тариф}} W}{k_1 C_{\text{рем.}}} \ln \left(1 - \frac{\Delta k}{T_{\text{МРП}} * k_0} T \right)}{\frac{T}{T_{\text{МРП}}} \left(\frac{C_{\text{рем.}}}{C_{\text{рем.}}} + \frac{C_{\text{тариф}} W}{C_{\text{рем.}} k_0} * T_{\text{МРП}} \right)} = \frac{1 - \frac{C_{\text{тариф}} W * T_{\text{МРП}}}{\Delta k * C_{\text{рем.}}} \ln \left(1 - \frac{\Delta k}{k_0} \tau \right)}{\tau \left(1 + \frac{C_{\text{тариф}} W * T_{\text{МРП}}}{k_0 C_{\text{рем.}}} \right)} = \\ &= \frac{1 - (\Omega / \Delta k) \times \ln \left(1 - (\Delta k / k_0) \cdot \tau \right)}{\tau (1 + \Omega / k_0)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Omega = \frac{C_{\text{тариф}} * W * T_{\text{МРП}}}{C_{\text{рем.}}}$, $\tau = \frac{T}{T_{\text{МРП}}}$

Приведенное значение расходов (см. ф. (4)) зависит от безразмерного времени наработки до очередного предупредительного капитального ремонта τ (в долях от установившегося на данном предприятии среднего МРП), безразмерного комплекса Ω , пропорционального отношению расходов на оплату электроэнергии за время, равное МРП, к расходам на капитальный ремонт насоса, а также от величин начального КПД насоса k_0 и величины падения КПД Δk . Эта функция имеет минимум, определить который можно исходя из известного правила: аргумент экстремума функции находится как корень решения уравнения

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{C_{\text{средн}}^k}{C_{\text{средн}}^0} \right) = -\frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{\Omega}{\Delta k} * \ln \left(1 - \frac{\Delta k}{k_0} \tau \right) \right) + \frac{\Omega}{k_0} * \frac{1}{1 - \Delta k / k_0} = 0. \quad (5)$$

Решение (5) не может быть найдено аналитически, поэтому нами проведено численное решение, которое с достаточной точностью аппроксимируется функцией:

$$\tau_{\text{оптим.}} = k_0 * (\Delta k)^{-0.5887} * \Omega^{-0.4839+0.08*\Delta k} \quad (6)$$

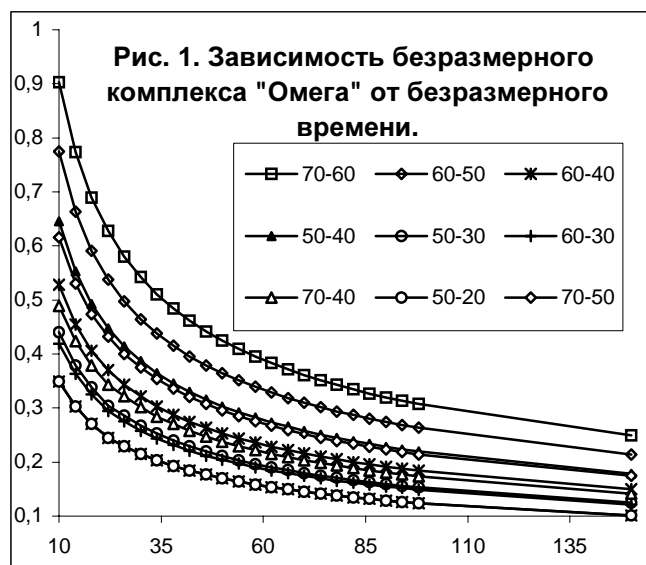
при изменении влияющих параметров в практически значимых пределах: $k_0 = 50 \dots 70$, $\Delta k = 10 \dots 30 \%$, $\Omega = 10 \dots 150$ (что соответствует диапазону изменения $W = 100 \dots 1000$ кВт, $C_{\text{рем.}} = 25000 \dots 200000$ рублей, $T_{\text{МРП}} = 100 \dots 730$ суток, $C_{\text{тариф}} = 0.72$ руб./кВт-час).

График этой функции приведен на Рис.1. при разных значениях k_0 и Δk .

Из (6) следует, что

$$T_{\text{оптим.}} = T_{\text{МРП}} * k_0 * (\Delta k)^{-0.5887} * (C_{\text{тариф}} * W * T_{\text{МРП}} / C_{\text{рем.}})^{-0.4839+0.08*\Delta k} \quad (7)$$

Ниже (см. Табл. 1) приведены результаты сравнительных расчетов, используя



ф.(7) и корни уравнения (5) для вычисления оптимального межремонтного периода $T_{\text{опт}}$. Видно вполне удовлетворительное их совпадение (расчет выполнен для крайних значений: $k_0 = 50$, $\Delta k = 30\%$, $T_{\text{МРП}} = 730$ суток).

В Табл.2 приведены результаты расчета годового экономического эффекта от внедрения методики превентивного капитального ремонта насосов с целью недопущения их работы с КПД ниже оптимального (в смысле минимума функции (4)).

ТАБЛИЦА 1.
РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ $T_{\text{опт}}$ ПО КОРНЮ УРАВНЕНИЯ (5) И АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ (7)

Ω	10	14	18	22	26	30
$T_{\text{опт}}$ (из корня ур. (5))	255	220	197	180	167	157
$T_{\text{опт}}$ (по ф. (7))	257	220	196	178	165	155
Ω	34	38	42	46	50	54
$T_{\text{опт}}$ (из корня ур. (5))	148	140	134	129	124	119
$T_{\text{опт}}$ (по ф. (7))	146	139	132	127	122	118
Ω	58	62	66	70	74	78
$T_{\text{опт}}$ (из корня ур. (5))	115	112	109	106	103	100
$T_{\text{опт}}$ (по ф. (7))	114	111	108	105	102	100
Ω	82	86	90	94	98	150
$T_{\text{опт}}$ (из корня ур. (5))	98	96	94	92	90	73
$T_{\text{опт}}$ (по ф. (7))	97	95	93	91	90	74

ТАБЛИЦА 2

**СВОДНАЯ ТАБЛИЦА РАСЧЕТА ГОДОВОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА
ОТ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДИКИ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО КАПИТАЛЬНОГО
РЕМОНТА НАСОСОВ (В РАСЧЕТЕ НА ОДИН АГРЕГАТ)**

Нач. Гкпд, %	Кон. Гкпд, %	МРП, сут	Т _{опт} кап- рем- онта, сут	Удельные затраты на закачку 1 м ³ воды, руб		Средняя удельная мощность, кВт*час/м ³		Годовой экономиче- ский эффект по од- ному насосу, руб
				После внедре- ния	До вне- дрения	После внедре- ния	До вне- дрения	
Напор 1900 м, подача 180 м ³ /час, гидравлическая мощность 950 кВт								
45	35	365	88	9,60	10,35	12,97	14,29	1 182 195
		500	104	9,52	10,32	12,91	14,28	1 270 908
		730	126	9,44	10,30	12,85	14,27	1 363 729
50	40	365	98	8,64	9,20	11,67	12,68	884 983
		500	115	8,56	9,17	11,61	12,68	961 253
		730	140	8,49	9,15	11,57	12,67	1 037 544
60	50	365	118	7,20	7,53	9,73	10,36	512 011
		500	138	7,13	7,50	9,68	10,36	581 698
		730	168	7,08	7,48	9,64	10,35	642 768
70	60	365	137	6,16	6,37	8,33	8,76	329 730
		500	162	6,12	6,35	8,30	8,76	363 419
		730	196	6,07	6,33	8,26	8,75	421 155
<p>ПРИМЕЧАНИЕ: 1. Стоимость электроэнергии принята 0.72 рубля за 1 кВт-час, стоимо- сть капремонта принята в 100 000 рублей.</p> <p>2. Удельные затраты рассчитаны только для электроэнергии и стоимо- сти капремонта, поскольку остальные затраты неизменны.</p>								

Исходя из вышеизложенного видно, что при корректном определении введенных нами значений входящих параметров (КПД начальное и конечное, время износа, стоимость капремонта и т.п.), а также закона (темпа) снижения КПД в течении МРП, эту процедуру можно уточнить по всем типоразмерам насосов данного предприятия.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Яременко О.В. Испытания насосов.- М.: Машиностроение, 1976.- 225 с.
2. Колосов Б.В. Определение параметров высоконапорных насосов в рабочих условиях.// РНТС Машины и нефтяное оборудование.- М.: ВНИИОЭНГ, 1981.- № 11, с. 12-14.
3. Рабинович Е. З. Гидравлика: Учебное пособие для вузов.- М.: Недра, 1980.- 278 с.
4. Ремонт и монтаж бурового и нефтепромыслового оборудования. Учебное пособие (Авторы Б. А. Авербух, Н. В. Калашников, Я. М. Кершенбаум, В. Н. Протасов).- М.: «Недра», 1976.- 368 с.
5. Колпаков Л. Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов.- М.: Недра, 1985.- 184 с.

6. Методика определения КПД насосных агрегатов магистральных нефтепроводов.// РД 39-0147103-307-85, Миннефтепром СССР, утвержден 14 декабря 1985 г.- Уфа: ВНИИСПТнефть, 1986.- 36 с.