

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ЛСС ПРИ ВЫБОРЕ НАСОСА ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ АБРАЗИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ

**Ю. Я. Ткачук**, канд. техн. наук, доцент;

**С. А. Лобан**, студент;

**Е. В. Шатрюк**, студентка;

*Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина*

*Исследовано влияние срока эксплуатации насосов для перекачки абразивных жидкостей на стоимость их жизненного цикла. Выведена аналитическая зависимость экспоненциального вида, подтверждающая эту связь. Полученная зависимость может быть использована на стадии жизненного проектирования и прогнозирования изменения стоимости жизненного цикла во времени.*

**Ключевые слова:** *Стоимость жизненного цикла, абразивная жидкость, пульсационный, дисковый, центробежный насосы.*

### ВВЕДЕНИЕ

Растущие цены на энергоносители, ужесточающаяся конкуренция привели к необходимости более глубокого анализа затрат на весь срок службы технических систем, в том числе гидравлических систем с насосами. Так возникла идея анализа стоимости жизненного цикла – ЛСС (Life Cycle Cost). Эта идея не нова, ей уже почти три десятилетия. Однако она долго оставалась чисто теоретической концепцией, упоминаемой в докладах на конференциях по экономике и ссылках в научных трудах, но редко применялась на практике.

Дело в том, что для большинства простых случаев эксплуатации технических систем нет особой необходимости в глубоком анализе, свойственном ЛСС. Другое дело сложные и дорогостоящие технические системы. Неслучайно первым стандартом, в котором излагались принципы ЛСС, был стандарт ISO 14040 как часть международного стандарта по охране окружающей среды (ISO 14000). Этот документ касается строительства и установки оборудования морской нефтедобычи.

Следующий стандарт, в котором излагались принципы ЛСС для гидросистем с насосами, был опубликован в 1999 г., первоначально предназначался для военной авиапромышленности, но вскоре стал использоваться в США как национальный стандарт.

Международному признанию принципов ЛСС очень способствовали публикации гидравлического института (Hydraulic Institute) и Европампа (Europump).

Русскоязычные версии этих публикаций [1, 2] ускорили практические применение принципов ЛСС в России, Украине, Беларуси. Положительную роль в этом сыграли и публикации в Интернете.

В соответствии с [1] стоимость жизненного цикла гидросистемы с насосами является суммой восьми составляющих.

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d, \quad (1)$$

где  $LCC$  – стоимость жизненного цикла;

$C_{ic}$  – начальная стоимость, стоимость приобретения (насос, трубопроводы, вспомогательное оборудование);

$C_{in}$  – стоимость монтажа и пуско-наладочных работ (включая обучение персонала);

$C_e$  - стоимость энергии (предполагаемые затраты при работе гидросистемы, включая привод насоса, средства управления и вспомогательные службы);

$C_o$  - эксплуатационные затраты (оплата обслуживающего персонала при штатной работе гидросистемы);

$C_m$  - стоимость обслуживания и ремонта (запчасти, оплата человеко-часов ремонтникам);

$C_s$  - стоимость потерь от простоя оборудования, которое обслуживает гидросистемы);

$C_{env}$  - стоимость природоохранных мероприятий (устранение загрязнений от перекачиваемой среды и работы технологического оборудования);

$C_d$  - стоимость работ по демонтажу и утилизации оборудования (включая затраты на восстановление окружающей среды).

Однако не все восемь составляющих LCC одинаково значимы. Наиболее "весомы" первые шесть из восьми составляющих, последние две составляющие проявляют себя, по сути, тогда, когда жизненный цикл системы исчерпан.

Для упрощенного анализа гидросистем с насосами обычно достаточно учитывать первые шесть составляющих. При таком подходе будут учтены следующие технические факторы, связанные с эксплуатацией рассматриваемых гидросистем [3]:

1. Засорение подвода и отвода насосов, ведущее к останову и ремонту.
2. Замена статора и ротора.
3. Сбой универсального уплотнения.
4. Сбой уплотнения из-за радиальных нагрузок.
5. Засорение рабочего колеса, ведущее к останову и ремонту насоса.
6. Замена рабочего колеса насоса.

Некоторые из этих факторов могут быть устранены за счет предусмотренных мероприятий еще на стадии эскизного проектирования гидросистем с насосами [4]. Вопросы засорения рабочего колеса подробно рассмотрены в [5], а влияние отложений на элементах проточной части насосов и стенках трубопроводов – на снижение энергоэффективности гидросистемы в работе [6]. Рассмотрены также вопросы прогнозирования жизненного цикла технических систем [7]. Достаточно много накопилось и практических примеров использования LCC, есть и экспериментальные данные, однако теоретических обобщений явно недостаточно.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель данной статьи – используя принципы LCC и имеющиеся экспериментальные данные [5], вывести аналитическую зависимость между стоимостью жизненного цикла и временем эксплуатации различных типов насосов для первого года их эксплуатации при перекачивании суспензии, содержащей абразивные частицы.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Пусть известны требования к некоторой гидравлической системе для перекачивания жидкости с абразивными частицами, величины давления на входе и выходе в трубопроводную сеть, величина расхода жидкости, диаметры и материалы труб, установлены статьи расходов через определенный период времени функционирования системы, например, один год, в денежном измерении.

Известно, что всем условиям в той или иной степени могут удовлетворять насосные агрегаты с пульсационными, центробежными и дисковыми насосами [5].

Требуется сделать обоснованный выбор одного из вышеприведенных агрегатов с самыми низкими издержками за период эксплуатации гидравлической системы.

Составим дифференциальные уравнения, связывающие совокупные расходы со временем эксплуатации за требуемый период  $T$ :

$$dc = c \cdot kdT, \quad (2)$$

где  $dc$  – приращение совокупных расходов за период  $dT$ ;

$k$  – коэффициент пропорциональности.

Проведем разделение переменных:

$$\frac{dc}{c} = kdT. \quad (3)$$

Проинтегрируем выражение (3):

$$\int \frac{dc}{c} = k \int dT, \quad (4)$$

получим  $\ln c = kT + const$ .

Константу найдем из условия, что при  $T=0$  константа соответственно равна некоторой постоянной  $\ln c_0$ .

Тогда

$$\ln c = kT + \ln c_0 \quad (5)$$

или

$$\ln \frac{c}{c_0} = kT. \quad (6)$$

Отсюда

$$k = \frac{\ln \frac{c}{c_0}}{T}.$$

Переходя к нормированной переменной  $\tau = \frac{T}{T_m}$ , получим преобразование в безразмерной форме

$$k = \frac{\ln(c / c_0)}{\tau}. \quad (7)$$

Выражение (6) позволит при наличии экспериментальных данных установить зависимость  $c = f(\tau)$

Потенцируя выражение (5), получим

$$c = c_0 \cdot e^{k\tau}. \quad (8)$$

Выражение (8) описывает зависимость совокупных денежных расходов с оптимальным временем эксплуатации насосных агрегатов и может быть использовано для сравнения различных насосных агрегатов аналогичного назначения и выбора одного из них с наиболее низкими денежными расходами в соответствии с принципами ЛСС.

Для построения соответствующих графиков необходимо для каждого насосного агрегата заполнить две таблицы.

В первой таблице на основе экспериментальных графиков определяют локальные значения коэффициента пропорциональности  $k_i$ , пользуясь выражением (6), а затем находят его среднее значение для каждого насоса

$$K_c = \frac{\sum k_i}{n}, \quad (9)$$

где  $n$  - количество различных значений экспериментальных данных.

Во второй таблице, используя средние значения  $K_c$ , полученные по выражению (9), и подставляя его в выражение (8) получают  $n$  расчетных значений  $c_i$ . По этим значениям строят графики (рис. 1) для каждого типа насоса. В данном случае наименьшее значение совокупных расходов будет у дискового насоса, ему и следует в соответствии с принципами ЛСС отдать предпочтение.

Таблица 1 – Определение  $K_i$  для пульсационного насоса

$T_{i,мес}$	$\tau = \frac{T_i}{T_m}$	$C_{эi}$	$\frac{C_i}{C_0}$	$\ln \frac{C_i}{C_0}$	$K_i = \frac{\ln(C_i / C_0)}{\tau_i}$
0	0	$C_i = C_0 = 15$	1	0	0
2,0	0,167	19,0	1,26	0,23	1,39
4,0	0,333	24,0	1,6	0,47	1,41
5,5	0,458	28,0	1,92	0,65	1,42
7,0	0,583	32,5	2,16	0,77	1,32
9,5	0,792	42,9	2,66	0,98	1,24
12	1,000	56,5	3,76	1,34	1,34

Примечание. В колонке 3 приведено среднее значение экспериментальных данных

$$K_c = \frac{\sum K_i}{6} = 1,35.$$

Таблица 2 – Определение координат графика  $C = f(t)$  для пульсационного насоса

$T_{i,мес}$	$\tau = \frac{T_i}{T_m}$	$K_c \cdot \tau_i$	$e^{K_c \cdot \tau_i}$	$C_{pi} = C_0 \cdot e^{K_c \tau_i}$	$C_{эi}$
0	0	0	1	$C_{pi} = C_0 = 15$	15,0
2,0	0,167	0,225	1,25	18,7	19,0
4,0	0,333	0,45	1,56	23,5	24,0
5,5	0,458	0,62	1,86	27,8	28,0
7,0	0,583	0,79	2,20	32,9	32,5
9,5	0,792	1,07	2,91	43,7	42,9
12	1,000	1,35	3,86	57,9	56,5

Таблица 3 – Определение  $K_i$  для центробежного насоса

$T_{i,мес}$	$\tau = \frac{T_i}{T_m}$	$C_{эi}$	$\frac{C_i}{C_0}$	$\ln \frac{C_i}{C_0}$	$K_i = \frac{\ln(C_i / C_0)}{\tau_i}$
0	0	15,0	1	0	0
2,0	0,167	17,0	1,13	0,12	0,72
4,0	0,333	21,0	1,40	0,34	1,02
5,5	0,458	23	1,53	0,44	0,96
7,0	0,583	27	1,80	0,59	1,01
9,5	0,792	32,5	2,16	0,77	0,97
12	1,000	41,0	2,73	1,00	1,08

$$K_c = \frac{\sum K_i}{6} = 0,95.$$

Таблица 4 - Определение координат графика  $C = f(t)$  для центробежного насоса

$T_{i,мес}$	$\tau = \frac{T_i}{T_m}$	$K_c \cdot \tau_i$	$e^{K_c \cdot \tau_i}$	$C_{pi} = C_0 \cdot e^{K_c \tau_i}$	$C_{эi}$
0	0	0	1	$C_{pi} = C_0 = 15$	15,0
2,0	0,167	0,158	1,17	17,5	17,0
4,0	0,333	0,316	1,37	20,6	21,0
5,5	0,458	0,435	1,55	23,2	23,0
7,0	0,583	0,554	1,73	26,0	27,0
9,5	0,792	0,756	2,13	32	32,5
12	1,000	0,95	2,59	38,8	41,0

Таблица 5 - Определение  $K_i$  для дискового насоса

$T_{i,мес}$	$\tau = \frac{T_i}{T_m}$	$C_{эi}$	$\frac{C_i}{C_0}$	$\ln \frac{C_i}{C_0}$	$K_i = \frac{\ln(C_i / C_0)}{\tau_i}$
1	2	3	4	5	6
0	0	$C_{эi} = C_0 = 15$	1	0	0
2,0	0,167	16,0	1,07	0,06	0,39
4,0	0,333	17,5	1,17	0,16	0,47
5,5	0,458	18,0	1,20	0,18	0,40
7,0	0,583	18,9	1,30	0,26	0,44
9,5	0,792	20,0	1,33	0,28	0,35
12	1,000	21,5	1,43	0,36	0,36

$$K_c = \frac{\sum K_i}{6} = 0,40.$$

Таблица 6 – Определение координат графика  $C = f(t)$  для дискового насоса

$T_{i,мес}$	$\tau = \frac{T_i}{T_m}$	$K_c \cdot \tau_i$	$e^{K_c \cdot \tau_i}$	$C_{pi} = C_0 \cdot e^{k\tau_i}$	$C_{эi}$
0	0	0	1	15,0	15,0
2,0	0,167	0,067	1,07	16,03	16,0
4,0	0,333	0,133	1,14	17,13	17,5
5,5	0,458	0,183	1,20	18,0	18,0
7,0	0,583	0,233	1,26	18,9	18,9
9,5	0,792	0,317	1,37	20,6	20,0
12	1,000	0,400	1,49	22,4	21,5

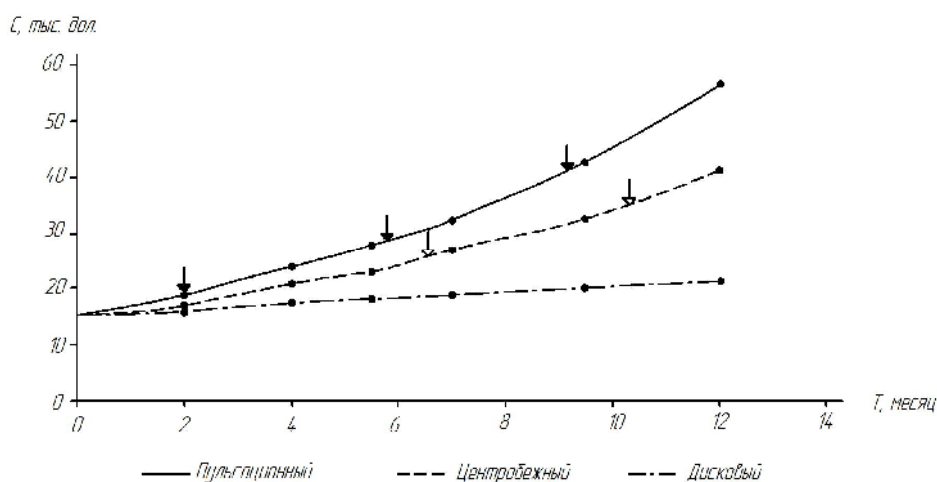


Рисунок 1 - Зависимость совокупных расходов  $C$  от времени эксплуатации  $T$  в течении первого года для пульсационного, центробежного и дискового насосов

## ВЫВОДЫ

1. Получена аналитическая зависимость стоимости жизненного цикла от времени эксплуатации в течение первого года для трех видов насосов, имеющих одинаковое функциональное назначение-перекачивание суспензии с абразивными частицами.
2. Установлено, что аналитическая зависимость для всех насосов описывается экспоненциальной функцией возрастающего типа.
3. Установлено, что характерной величиной является коэффициент при экспоненте, который для пульсационного насоса составляет 1,35, для центробежного – 0,95, для дискового – 0,40 .
4. Полученная аналитически зависимость может быть использована для количественной оценки вариантов проектируемой гидросистемы уже на стадии эскизного проектирования и прогнозирования стоимости жизненного цикла гидравлической системы с насосами для перекачивания суспензий с абразивными частицами.

## ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПІВ LCC ПРИ ВИБОРІ НАСОСА ДЛЯ ПЕРЕКАЧУВАННЯ АБРАЗИВНОЇ СУСПЕНЗІЇ

**Ю. Я. Ткачук, С. А. Лобан, Є. В. Шатрюк,**  
Сумський державний університет, м. Суми

*Досліджено вплив терміну експлуатації насосів для перекачування абразивних рідин на вартість їх життєвого циклу.*

*Виведено аналітичну залежність експоненціального виду, яка підтверджує цей зв'язок.*

*Отримана залежність може бути використана на стадії життєвого проектування і прогнозування зміни вартості життєвого циклу в часі.*

**Ключові слова:** *Вартість життєвого циклу, абразивна рідина, пульсаційний, дисковий, відцентровий насоси.*

## USE OF LCC GUIDELINES WHEN CHOOSING A PUMP FOR ABRASIVE SLURRIES

**Yu. Ya. Tkachuk, S. A. Loban, E. V. Shatruck,**  
Sumy State University, Sumy, Ukraine

*The article deals with the influence of the life of the pump for pumping abrasive liquids on the value of their life cycle.*

*The authors derive the analytic dependence of the exponential form confirming this relationship.*

*The obtained dependence can be used in the stage of the life design and prediction of changes in life cycle cost over time.*

**Key words:** *life cycle costs, abrasive fluid, pulsating pump, disk pump, centrifugal pump.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стоимость жизненного цикла насоса (LCC): Руководство по анализу LCC насосных систем. – М: Изд-во ООО «Софткомп», 2010. – 220 с.
2. Регулирование частоты вращения насосного оборудования. Руководство успешного применения. – Москва : РАПН.
3. Теория и практика анализа стоимости жизненного цикла (LCC) на примере Дисковых насосов DISCFLO. Электронный ресурс. – Режим доступа: [http://www.discflo.ru/info/i\\_lcc\\_i\\_diskoviy\\_nasos.html](http://www.discflo.ru/info/i_lcc_i_diskoviy_nasos.html)
4. Ткачук Ю. Я. Определение параметров насосных установок промышленных роботов на этапе эскизного проектирования // Вестник нац. техн. ун-та «КПИ». – 1999. – Т. 1, № 36. – С. 58–61.
5. Ткачук Ю. Я. К вопросу о теоретическом обосновании забивания приточной части динамических насосов / Ю. Я. Ткачук, А. А. Евтушенко, С. Ю. Смертяк // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье; Сборник научных трудов ХГПУ. – Харьков, 1998. – Вып. 6, Ч. 2. – С. 394–404.
6. Ткачук Ю. Я. Отложения на элементах проточной части насосов и стенках трубопроводов и их влияние на энергосбережение / Ю. Я. Ткачук, А. А. Евтушенко, С. Ю. Смертяк // Тезисы докладов научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов. – Сумы: Изд-во СумГУ, 1998.
7. Ткачук Ю. Я., Суміна О. М. Методичний підхід до прогнозування інвестиційно-інноваційного циклу технічних систем // Механізм регулювання економіки. – 2009. – № 4, Т. 2. – С. 35–42.

*Поступила в редакцію 7 сентября 2012 г.*