

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ
БАГАТОСТУПІНЧАСТИХ СВЕРДЛОВИННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ
НАСОСІВ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ ОБРОБІТКУ
ПОВЕРХНІ**

Викладено вплив технологічних факторів обробітку поверхні торцевих пар тертя в електровідцентрових насосах для добування пластових рідин і та оптимізовано їх параметри.

Ключові слова: електровідцентрові насоси, гідрозахисту електродвигуна; витік; ущільнення.

Вступ. При видобуванні рідких корисних копалин із свердловин одним із основних агрегатів, які широко використовуються, є насоси і серед них найбільш поширеним типом для глибин понад 2000 м є електричні відцентрові. Як показав аналіз роботи цих насосів на промислах нафтових регіонів, оптимальний терміном їх роботи є 200...250 діб [1].

Підвищення надійності і довговічності роботи цих насосів дає можливість зменшити собівартість витрат на заміну занурених електровідцентрових насосів у свердловинах, які складають 50...60 % від вартості самого обладнання.

Проблемам підвищення ресурсу та питанням спрацьовування поверхні деталей під дією різних факторів а особливо дії абразиву присвячено багато праць, де розглядаються різні аспекти даної проблеми.

Для аналізу причин відмовлення та розрахунку надійності, зібрано й опрацьовано матеріали із 100 установок електровідцентрових насосів НГВУ «Полтаванафтогаз» Глинсько-Розбишевського родовища.

На основі цих матеріалів встановлено, що у 73 випадках відмовлення виникли в електровідцентрових насосах, що становить 41,42 % від загальної суми відмовлень.

Друге місце серед усіх відмовлень займає пошкодження електричного кабелю — 32,33 %.

На третьому — пошкодження пристрою гідрозахисту електродвигуна — 16,5 %.

Основними причинами відмовлення від роботи є пошкодження ущільнення між робочими колесами і струмененаправляючим апаратами (рис. 1), це пошкодження викликає осадку усіх робочих коліс, що призводить до защемлення валу та викликає перевантаження зануреного електродвигуна, погіршенню його охолодження, так як він охолоджується проточною рідиною, що прокачується. Воно піддається найбільш інтенсивній дії абразивних часток, які проникають в насос із вуглеводневою сировиною. Такі відмовлення у роботі зустрічаються в 30...35 випадках, що становить приблизно 34,1 %.

Змащування поверхонь торцевого ущільнення, що труться здійснюється рідиною, що перекачується.

Огляд останніх джерел і публікацій. В залежності від величини витіку через ущільнення може утворитися суцільна плівка по всій площі поверхні контакту (рідинне тертя) то зношування буде мінімальне.

При наявності гарної рідинної плівки між поверхнями кілець, що труться, ущільнення не буде нагріватися і зношуватися, але при цьому витік рідини між кільцями буде значний. При граничному змащенні поверхонь, що труться, витік може різко зменшуватися, але при цьому може збільшуватися нагрівання [2, 3].

При сухому терті і незначному питомому тиску на кільцях можна цілком усунути витік, але в цьому випадку нагрів і зношування кілець можуть досягти небезпечних значень.

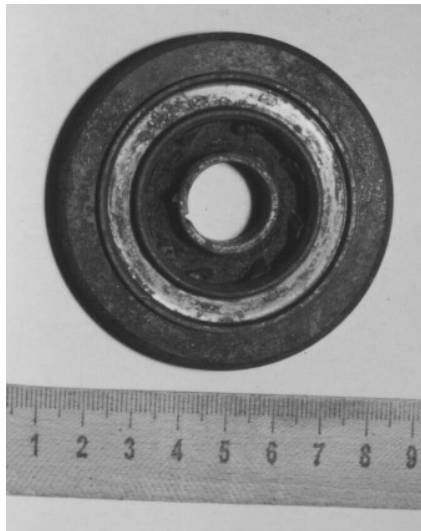


Рис. 1. Пошкодження робочого колеса і струмененаправляючого апарату відцентрових електронасосів

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Основними умовами при виборі і конструюванні ущільнення є тиск (точніше, перепад тиску) між порожнинами, що ущільнюються, витік, зношування кілець, тобто довговічність ущільнення, внутрішнє і зовнішнє середовище, споживане потужність, температура нагрівання і т. д.

Недостатнє змащення і присутність абразивних часток прискорюють їхнє зношування.

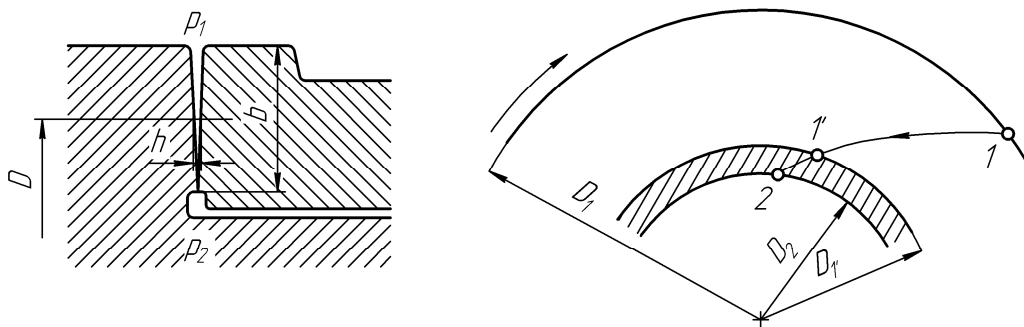


Рис. 2. Бічний розріз ущільнення

Постановка завдання. В роботі пропонується за рахунок обробітку поверхні досягти оптимальні величини зношення забезпечивши регулювання товщини плівки змащування і охолодження.

Характер режиму потоку і кількість рідини, що протікає в зазорі торцевого ущільнення, для ідеального випадку можна уявити собі, користуючись рис. 2 і вважаючи при цьому, що частки рідини, проникаючи у вузьку щілину між кільцями, утворюють ламінарний потік.

Кількість рідини, що протікає між цими двома нерухомими кільцями може бути орієнтовно визначено за допомогою рівняння ламінарного потоку, см³/хв:

$$q = \frac{\pi D h^3 p}{12 \mu b}, \quad (1)$$

де D – середній діаметр кільця, мм; h – середня висота зазору, мм; μ – динамічна в'язкість, кГ·сек/м²; b – ширина ковзкої поверхні кільця, мм; p – перепад тиску, кГ/см².

Приведене рівняння дає лише наближене теоретичне уявлення про можливий характер витoku і його залежність від деяких основних параметрів. Ламінарний рух рідини між поверхнями ковзання ущільнення можна скоріше віднести до часткового прикладу, чим до загального явища.

При рідкому терті з великим витком через щілину і певному стані поверхні тертя, рівняння (1) може дати меншу погрішність, чим при граничному терті.

Як показують дослідження торцевих ущільнень із граничним тертям, на величину витку істотно впливає відцентровий тиск між дотичними поверхнями. Витік змінюється прямо пропорційно квадратові зазору між дотичними поверхнями і зворотно пропорційно квадратові питомого тиску на кільця. Стан поверхонь ковзання, тобто прямолінійність і шорсткість, дуже впливає на розподіл тиску в зазорі і витік.

Більш точно величина витку встановлюється дослідним шляхом для кожного виду ущільнення окремо.

Швидкість (інтенсивність) зношування для різних пар тертя коливається від сотих часток до десятків і сотень мікронів за годину.

Існує декілька методів визначення антифрикційних властивостей пар тертя. Одним із найпростіших методів, що не потребує випробовувальних машин складної конструкції є зразок, який під час випробування притискується до диску що обертається. Але такий метод не може дати повної оцінки пари тертя, що працює у електровідцентрових насосах для добування нафти де величина тиску сягає до 30 МПа і температури рідини доходить до 150 °С.

Випробування для визначення коефіцієнту тертя проводились на стенді для випробування на інтенсивність торцевого зношування пар тертя, за умов відсутності абразиву.

Величину коефіцієнту тертя визначали за формулою:

$$f = \frac{F_{\text{тр}}}{\pi \cdot D \cdot b \cdot p_k}, \quad (2)$$

де $F_{\text{тр}}$ – сила тертя, яка залежить від конструкції ущільнення; D – середній діаметр ущільнюючого кільця, см; b – ширина контакту ущільнюючого кільця, см; p_k – перепад тиску в ущільненні, МПа.

Сила тертя визначалась за формулою:

$$F_{\text{тр}} = F_p \cdot p_c / n - G, \quad (3)$$

де p_c – тиск рідини, яку перекачує насос, МПа; F_p – площа поверхні тертя, см²; n – кількість робочих ступенів насосу; G – маса робочого колеса, кг.

Коефіцієнт тертя визначався для різних типів покриття та ущільнення.

Моделювання процесів торцевого зношування використовується для вирішення проблем по стійкості та для оцінки умов спрацювання трубоз'єднань у конкретних умовах експлуатації і при вивченні фізичних основ прогнозування їх довговічності.

Основний матеріал і результати. Межі працездатності моделі визначалися розрахунково-експериментальним шляхом. Для оцінки інтенсивності зношування пар тертя навіть для найбільш вживаних матеріалів ще не одержано простих залежностей, здатних описати процеси зношування.

У парах тертя розчинонасосів іде процес спрацювання за рахунок попадання абразиву між поверхнями тертя. У роботі [2] запропоновано формулу, яка характеризує в загальному вигляді об'єм зношування:

$$V_{\text{спр}} = c \cdot \frac{S \cdot p \cdot d}{HV}, \quad (4)$$

де p – тиск, МПа; S – шлях тертя, м; d – діаметр абразиву, мм; HV – твердість поверхні тертя, МПа; c – коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей матеріалу пари тертя і його значення наближається до коефіцієнту тертя.

Знаючи, що $S = \pi D_{\text{сер}}$ отримаємо співвідношення:

$$S_{\text{сер}} = 12 \frac{q \cdot \mu \cdot b}{p \cdot Rz^3}, \quad (5)$$

де Rz – шорсткість поверхні, яка забезпечує мінімальний зазор в парі тертя h (формула (1)), та підставивши $D_{\text{сер}}$ у рівняння (5) отримаємо:

$$V_{\text{спр}} = \frac{c \cdot d}{HV} \cdot 12 \frac{q \cdot \mu \cdot b}{Rz^3}. \quad (6)$$

Позначимо $c \cdot d \cdot q \cdot \mu \cdot b = \Phi$ тоді вираз (6) прийме вигляд:

$$V_{\text{спр}} = 12 \frac{\Phi}{HV \cdot Rz^3}. \quad (7)$$

В свою чергу відомо, що $Rz = S^2 / (8r^2)$ [7], де S – подача, а r – радіус заокруглення різця при вершині, то інтенсивність спрацювання при торцевому терті буде залежати тільки від технологічних факторів, обумовлених властивостями матеріалу та його обробітком, підставивши значення Rz у формулу (7), одержимо:

$$V_{\text{спр}} = \frac{6144 \cdot \Phi \cdot r^6}{HV \cdot S^6}. \quad (8)$$

З урахуванням великої кількості змінних, що входять до функції Φ , то об'єм спрацювання при торцевому терті від технологічних факторів, в загальному вигляді можна записати виразом:

$$V_{\text{спр}} = f(HV, r, S). \quad (9)$$

Для математичного моделювання процесу зношування від технологічних факторів використано поліном другого порядку.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n + a_{n+1}x_1^2 + \dots + a_{2n}x_n^2 + a_{2n+1}x_1x_2 + \dots + a_mx_{n-1}x_n. \quad (10)$$

Кількість дослідів при плануванні експерименту визначалася за формулою:

$$N = 2n - p + 2n + 1 \quad (11)$$

з кількістю факторів плану $n = 3$ та генератором плану $p = 0$, звідси $N = 15$, з мінімальною кількістю повторень, що дорівнює трьом ($\gamma = 3$), то загальна кількість експериментів дорівнює 45.

За фактори варіювання прийнято: V – швидкість різання, м/хв.; t – глибина різання, мм; S – подача, мм/об.

Функція відгуку (Y) – зношування поверхні тертя.

Для проведення оптимізації мінімального зношування тертя робочого колеса за режимами різання приймалась функція відгуку виду:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3. \quad (12)$$

Значення факторів та рівні їх варіювання приведені в табл. 1.

Таблиця 1. Значення факторів та рівні їх варіювання

Фактори		Твердість матеріалу, МПа	Радіус заокруглення вершини різця, мкм	Подача, мкм/об
Найменування	Код	x_1	x_2	x_3
Основний рівень	0	4500	100	500
Зіркова точка	1,215	5470	122	610
Верхній рівень	1	4670	115	580
Нижній рівень	-1	4330	85	420
Зіркова точка	-1,22	3530	78	390

Результати досліджень у відповідності з планом експериментів занесені в табл. 2. Одержані результати опрацьовані на ПЕОМ з використанням прикладних та спеціально розроблених програм.

Таблиця 2. Залежність інтенсивності зношування від технологічних факторів

Кодовані значення факторів	$y = f(x_1)$	$y = f(x_2)$	$y = f(x_3)$
1,215	0,62	2,185	1,252
1	0,81	1,963	1,122
0	1,09	1,09	1,09
-1	0,37	0,481	2,002
-1,215	0,085	0,385	2,321

Визначено коефіцієнти регресії та одержано модель процесу у вигляді поліному другої степені:

$$y = 1,087 + 0,22x_1 + 0,741x_2 - 0,44x_3 - 0,50x_1^2 + 0,132x_2^2 + 0,472x_3^2 + 0,105x_1 \cdot x_2 + 0,66x_1 \cdot x_3 - 0,39x_2 \cdot x_3. \quad (13)$$

Перевірка адекватності моделі проведена на основі критерію Фішера.

Квадрат різниці відхилень $S_R = 1,342711$, при числі ступенів свободи $\gamma = 5$.

Дисперсія адекватності $S_R = 1,342711/5 = 0,2685$.

Помилка досліду (дисперсія відновлення) $Se = 16,275$, з числом ступенів свободи $\varphi_2 = 30$ та кількістю повторень $\gamma = 3$.

Дисперсія коефіцієнтів $S^2 = 16,275/(3 \cdot 30) = 0,18083$. Перевірка адекватності виконувалась за критерієм Фішера:

$F = 0,2685/0,18083 = 1,485 < F_{кр} = 19,3$ – отже, критерій Фішера моделі менший критичного.

На основі рівняння в кодованих значеннях побудовано графіки, які дають основну тенденцію впливу факторів варіювання.

Замінивши значення x_i на реальні величини одержано розрахункову формулу в реальній системі координат:

– для твердості поверхні тертя, м/хв

$$x_1 = \frac{HV - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{HV - (5470 + 3530)/2}{(5470 - 3530)/2};$$

– для радіуса заокруглення вершини різця, мм

$$x_2 = \frac{r - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{r - (0,1 + 0,078)/2}{(0,1 - 0,078)/2};$$

– для подачі, мм/об

$$x_3 = \frac{S - (X_{+1,215} + X_{-1,215})/2}{(X_{+1,215} - X_{-1,215})/2} = \frac{S - (0,5 + 0,39)/2}{(0,5 - 0,39)/2}$$

Після проведених спрощень, одержано остаточну математичну модель:

$$I = 77,26 - 0,0016 \cdot HV - 1162,65 \cdot r - 25,26 \cdot S - 5 \cdot 10^{-7} \cdot HV^2 + 1090,91 \cdot r^2 + 156,04 \cdot S^2 + 0,11 \cdot HV \cdot r - 0,011 \cdot HV \cdot S - 646 \cdot r \cdot S. \quad (14)$$

Одержана залежність математично проаналізована на мінімальне значення величини зношування в залежності від технологічних факторів при виготовленні ущільнення.

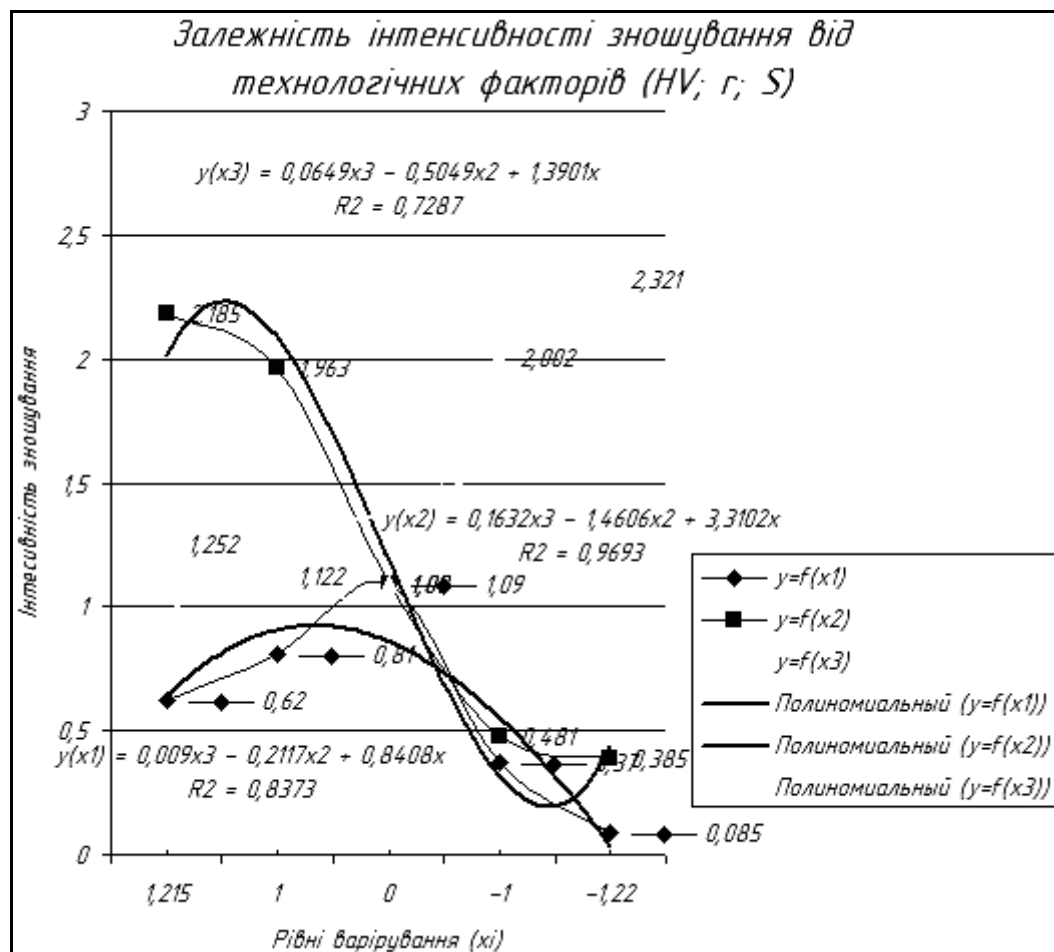


Рис. 3. Графіки основних залежностей при одній змінній при фіксації інших факторів на нульовому рівні

Встановлено що мінімальне зношування ($I_{\min}$) дорівнює $I = 0,567$ мг/год, при $Ra = 2,88$ мкм, яке можна прирівняти до $Ra = 3,2$ мкм, що відповідає стандартній величині.

Висновки

1. Найбільш слабким місцем у електровідцентрових насосах є ущільнення між ступеннями, яке також сприймає зусилля від стовпа прокачуваної рідини.
2. При підвищенні температури взаємодії поверхні з абразивом різко зростає інтенсивність спрацьовування і коефіцієнт тертя [5].
3. Для оцінки об'єму спрацьовування в залежності від різних факторів твердості металевих поверхонь та властивостей абразиву найбільш придатною є формула Хрущова-Бабічева, але вона не враховує фізичних характеристик шару покриття.
4. Математичну модель проаналізована на мінімальне значення величини зношування в залежності від технологічних факторів при виготовленні ущільнення.
5. Встановлено, що інтенсивність зношування залежить від шорсткості поверхні тертя. Оптимальною шорсткістю поверхні тертя при даних випробуваннях є $Ra = 3,2$ мкм, при якій інтенсивність спрацьовування мінімальна та становить $I = 0,567$ мг/год.

Література

1. Калашиников, А.В. Методика визначення ресурсів роботи багатоступінчатих свердловинних відцентрових насосів [Текст] / А.В. Калашиников, І.А. Калашикова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – Вип. 2/1(20). – С. 79–82.

2. Калашиников, А.В. Основные закономерности абразивного изнашивания газотермического покрытия [Текст] / А.В. Калашиников, Д.Г. Тищенко // Механизация строительства. – 1997. – Вып. № 12. – С. 26–29.
3. Калашиников, А.В. Анализ абразивного износа и методы повышения ресурса работы деталей растворонасосов [Текст] / А.В. Калашиников, В.М. Корж // Автоматическая сварка. – 1998. – Вып. № 6 – С. 27–30.
4. Нефтепромысловое оборудование [Текст]: справ. / Под ред. Е.И. Бухаленко. – М.: Недра, 1990. – 559 с.
5. Проников, А.С. Надежность машин [Текст] / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
6. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Макаров, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 276 с.
7. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экспериментальных условиях [Текст]: справ. / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 543 с.
8. Икрамов, У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа [Текст] / У.А. Икрамов. – М.: Машиностроение, 1987. – 287 с.

© I.A. Калашникова, А.В. Калашников

И.А. Калашникова, ассист., А.В. Калашников, к.т.н., доц.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОТЫ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ СКВАЖИННЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Изложено влияние технологических факторов обработки поверхности торцевых пар трения в электроцентробежных насосах для добычи пластовых жидкостей и оптимизировано их параметры.

Ключевые слова: электроцентробежные насосы, гидрозащита электродвигателя, исток, уплотнение.

I.A. Kalashnikova, assistant, A.V. Kalashnikov, Ph.D., Associate Professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

IMPROVING LIFE DURATION OF THE MULTISTAGE CENTRIFUGAL BOREHOLE PUMPS BY TECHNOLOGICAL METHODS OF SURFACE TREATMENT

It examines the impact of technological factors of surface treatment of end friction pairs in electric submersible pumps for the extraction of reservoir fluids and their parameters are optimized.

Keywords: electric centrifugal pumps, motor seal section, source, seal.