

# *Машини нафтової та газової промисловості*

---

---

УДК 622.276.054

## **ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ ТА РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНИХ ПЛАНІВ-ГРАФІКІВ ЇЇ РЕМОНТІВ**

**В. В. Лопатін<sup>1</sup>, Б. В. Копей<sup>2</sup>, І. Б. Копей<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України;  
49005, Дніпро-5, вул. Сімферопольська, 2а;  
тел. +38(0562) 46-01-51; e-mail: vlor@ukr.net*

<sup>2</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, Івано-Франківськ, Карпатська 15;  
тел. +38 (0342) 72-71-01; e-mail: koreyb@ukr.net*

<sup>3</sup>*ПрАТ "Івано-Франківський локомотиво-ремонтний завод";  
76000, м. Івано-Франківськ, вул., Залізнична, 22;  
тел. +38 (066) 4553886; e-mail: koreyi@i.ua*

*Забезпечення працездатності обладнання можливе за відомих значень наробітку деталей до відмови або між відмовами. Завдання вибору величини наробітку ускладнюється тим, що розподіл відмов в часі має ймовірнісний характер. Існує оптимальне значення наробітку, при якому сума витрат буде мінімальною. Методи знаходження оптимального терміну відновлення обладнання, запропоновані в роботі, дозволяють точніше визначати ресурс роботи нафтогазового обладнання та розробляти раціональну стратегію їх технічного обслуговування і ремонту.*

**Ключові слова:** *відмова, наробіток, ресурс, обладнання, ремонт.*

**Постановка проблеми.** Ефективна організація ремонтних робіт, що визначають мінімальний рівень простоїв бурового та нафтопромислового обладнання та мінімальну величину витрат підприємства на забезпечення працездатності обладнання, можлива за відомих значень наробітку деталей до відмови або між відмовами. Завдання вибору величини наробітку ускладнюється тим, що розподіл відмов у часі носить ймовірнісний характер.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі роботи [1, 2], де проведено випробування для визначення фактичного наробітку між відмовами з метою оцінки надійності роботи бурового та нафтопромислового обладнання.

В роботі [3] випробування на відмову бурового обладнання проведено двома методами: розглянуто наробітки між відмовами окремих вузлів та деталей і наробітки між відмовами обладнання загалом незалежно від того, яка з деталей вийшла з ладу. Перший метод використовується для визначення величини наробітку деталей та вузлів бурової лебідки, другий – для інших видів бурового обладнання.

Обидва автори ставлять та вирішують завдання визначення оптимальних значень основних показників надійності обладнання. Надійність нафтопромислових насосів розглядається по-детально з визначенням усереднених значень наробітку між відмовами та ймовірності відмов [2]. Однак, викладений в роботі методичний підхід визначення оптимальної величини наробітку між відмовами для вирішення поставленого завдання не підходить з двох причин:

- для вибору оптимального значення наробітку між відмовами в умовах експлуатації обладнання немає необхідності порівнювати цей показник для базового і нового обладнання із збільшеним наробітком;

- з точки зору ефективної організації ремонтного обслуговування необхідно з ряду фактичних значень наробітків між відмовами вибрати оптимальне, що не передбачено методичним підходом, який аналізується. Технічна документація заводів-виготовлювачів обладнання, а також діюче “Положення про систему технічного обслуговування і планового ремонту бурового та нафтопромислового обладнання” регламентує терміни проведення змащування обладнання, технічного обслуговування, поточного і капітального ремонту обладнання. Однак терміни заміни окремих деталей, як правило, не встановлюються.

**Мета досліджень.** Таким чином, для нафтопромислового обладнання на сьогодні відсутні достатньо обґрунтовані величини наробітку деталей між відмовами, а також методичні підходи для їх визначення, що стримує широке і ефективне застосування системи планових ремонтів, призводить до значних простоїв виробничих об’єктів у зв’язку з несправністю обладнання.

**Виклад основного матеріалу.** Методичний підхід, що пропонується, полягає в наступному. Аналіз фактичних даних по заміні деталей та вузлів верстатів-гойдалок у процесі експлуатації показав, що 30-40% випадків заміни були виконані при близьких за величиною наробітках. Решта 60-70% випадків розподілені по обидва боки від цього наробітку, причому, з наближенням до мінімального і максимального значень наробітку кількість випадків зменшується. Якщо за граничний наробіток, при якому відбувається заміна деталі, прийняти фактичне мінімальне її значення, тоді всі ремонтні роботи будуть виконані в термін, що плану-

ється. При цьому скорочуються прості виробничих об'єктів УБР та НГВУ (бурових установок, свердловин, що експлуатуються) у зв'язку з несправністю обладнання. Як показав аналіз фактичного стану організації ремонтних робіт в НГВП "Долина нафтогаз" ВАТ "Укрнафта" таке скорочення складає, як правило, близько 24 годин.

З іншого боку заміна деталі при наробітку, рівному мінімальному, призводить у більшості випадків (понад 90%) до недовикористання ресурсу деталей, що викликає збільшення витрати запасних частин, збільшення кількості виконаних ремонтів.

При призначенні величини граничного наробітку, рівного максимально зареєстрованому на практиці, більшість деталей буде замінено після повної відробки. У цьому випадку збільшуються прості об'єктів, але буде повне використання ресурсу деталей, скоротиться кількість ремонтів.

З цих міркувань видно, що існує оптимальне значення наробітку, при якому сума витрат, пов'язана з простоями об'єктів, недовикористанням ресурсу деталей та збільшення кількості ремонтів буде мінімальною. Це положення можна записати у вигляді:

$$P = P_n + P_p + P_d \rightarrow \min,$$

де  $P$  – сумарні витрати;  $P_n$  – затрати підприємства, пов'язані з простоями об'єктів;  $P_p$  – витрати підприємств, пов'язані із збільшенням кількості ремонтів;  $P_d$  – витрати підприємства, пов'язані з недовикористанням ресурсу деталей.

Перша із складових сумарних витрат – витрати підприємства, пов'язані з недобором нафти, метрів свердловин при бурінні за час додаткових простоїв, що викликані проведенням ремонтних робіт після виходу обладнання з ладу. Ці витрати можна подати виразом:

$$P_n = n \cdot \Delta t \cdot q \cdot (C_T - C_C),$$

де  $n$  – кількість ремонтів, що виконані після відмови обладнання за рік;  $\Delta t$  – різниця часу простоїв об'єктів при виконанні ремонтів після відмови і в плановому порядку, діб;  $q$  – комерційна швидкість буріння, середній дебіт свердловин, що обладнані свердловинними штанговими насосними установками (СШНУ), м/(верст.доби), т/добу;  $C_T$  – вартість метра проходки, однієї тонни нафти за цінами підприємства з урахуванням прибутку, грн.;  $C_C$  – собівартість метра проходки, однієї тонни нафти, грн.

Втрати підприємства, пов'язані зі збільшенням кількості ремонтів обладнання, можуть бути визначені з виразу:

$$P_p = \left( \frac{a_{n+1}}{A_n} K_1 + \frac{a_{n+2}}{A_n} K_2 + \dots + \frac{a_{n+m}}{A_m} K_m \right) \cdot C_p,$$

де  $a_{n+1}, a_{n+2}, \dots$  – фактичний наробіток деталей між відмовами, що перевищує її граничне значення;  $K_1, K_2, \dots$  – фактична кількість заміни деталей при відповідних наробітках;  $C_p$  – вартість заміни деталі, грн.

Витрати, пов'язані з недовикористанням ресурсу деталей, можуть бути знайдені як визначена частина його вартості. Тут варто враховувати і ступінь дефіцитності конкретних деталей, а також витрати на їх отримання. Частина вартості деталей, пропорційна недовикористаному ресурсу, за своєю величиною незначна по відношенню до інших видів витрат, тому цим видом витрат можна знехтувати. Другий вид витрат визначити неможливо у зв'язку з відсутністю відповідних даних.

Таким чином, рівняння оптимізації наробітку деталей до відмови або між відмовами має вигляд:

$$n \cdot \Delta t q \cdot (C_T - C_C) + \left( \frac{a_{n+1}}{A_n} K_1 + \frac{a_{n+2}}{A_n} K_2 + \dots + \frac{a_{n+m}}{A_n} K_m \right) \cdot C_p \rightarrow \min .$$

Оскільки жоден із членів першої складової рівняння оптимізації не пов'язаний фундаментально з наробітком, мінімізувати рівняння аналітично відомими математичними методами неможливо. Тому розв'язок задачі будемо шукати графічно.

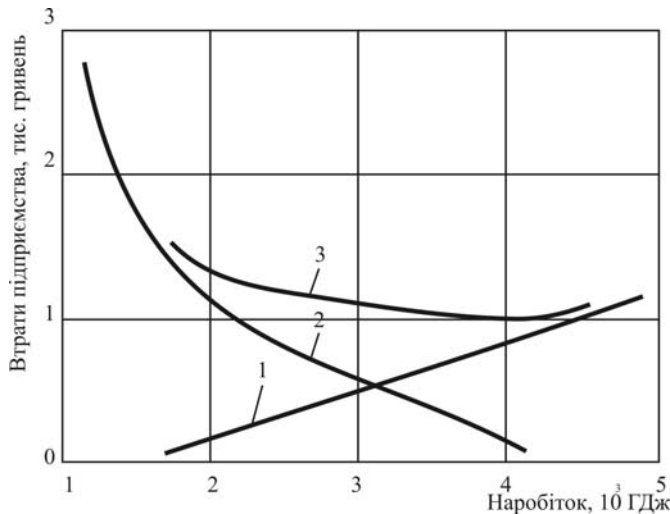
На рис. 1 подано графічне визначення оптимальної величини наробітку шатуна верстата-гойдалки 7СК-8 [4, 5]. Крива 1 відображає першу складову рівняння, крива 2 – витрати НГВУ, пов'язані із збільшенням кількості ремонтів при недовикористанні ресурсу шатунів, крива 3 результуюча, мінімум сумарних витрат відповідає нижній точці кривої 3. Оптимальна величина наробітку шатуна, яку слід використовувати при плануванні та виконанні ремонтів, складає  $4 \cdot 10^3$  ГДж. Криві побудовані за фактичними даними НГВП "Долинанафтогаз" ВАТ "Укрнафта". Наробіток шатуна виражений через об'єм роботи верстата-гойдалки, метод визначення якого викладено в [6].

Застосування цього методу дозволяє більш ефективно здійснювати ремонт обладнання, розраховувати потрібну кількість запасних частин, збільшити ефективність застосування системи планових ремонтів, якість виготовлення деталей та їхнього ремонту, що в кінцевому рахунку веде до зниження простоїв об'єктів видобутку нафти.

Один зі шляхів досягнення високого рівня надійності СШНУ – використання ефективної системи технічного обслуговування і ремонту обладнання. Розробка теоретичних основ такої системи вимагає розв'язання деяких теоретичних і практичних задач до оцінки надійності відновлюваних складових частин глибокої установки і вироблення стратегії призначення періодів технічного обслуговування і ремонту обладнання [5].

На основі аналізу експлуатаційної надійності верстатів-гойдалок проведемо визначення найбільш раціонального інтервалу їх технічного обслуговування і ремонту. Вирішимо це завдання використовуючи стратегію строгого періодичного відновлення [5]. Ця стратегія передбачає відновлення системи (верстата-гойдалки) після відмови, тобто, так зване, аварійне відновлення. Якщо ж система відпрацювала без відмов за-

даний інтервал часу  $t$ , то проводиться профілактичне обслуговування із заміною вузла.



- 1 – зміна величини прибутку НГВУ за рахунок проведення ремонтів в плановому порядку за різних значень граничного наробітку;  
 2 – втрати НГВУ, пов'язані зі збільшенням кількості ремонтів при недовикористанні ресурсу деталей; 3 – сумарні втрати

Рис. 1. Визначення оптимальної величини наробітку шатуна верстата-гойдалки СК-8

Визначення оптимального міжремонтного періоду ґрунтується на мінімізації питомих витрат на відновлення працездатного стану СШНУ у випадку її відмови. В табл. 1 наведено результати розрахунку параметрів надійності станків-гойдалок, виконані за допомогою розробленої бази даних на основі зібраної статистичної інформації.

В табл. 1 вказано середній наробіток на відмову  $T_{сер}$ , параметр форми розподілу  $\beta$ , масштабний параметр  $\eta$ , коефіцієнт лінійної кореляції  $R$ . Ця таблиця включає перелік основних вузлів СШНУ, які максимально відповідають за працездатність установки в цілому. Звичайно дану таблицю можна розширити за рахунок збільшення числа вузлів СШНУ. Так на рис. 2 більш повно представлено залежність оптимального наробітку вузлів і деталей верстата-гойдалки від навантаження на головку балансира. За відмову установки прийнято відмову хоча б одного вузла, згадуваного в табл. 1.

Нехай  $C_a$  і  $C_n$  – середні витрати на аварійне і профілактичне відтворення і при цьому  $C_a > C_n$ . Якщо інтервал відтворення дорівнює  $t$ , то інтенсивність експлуатаційних витрат

$$R(t) = \frac{C_a \cdot F(t) + C_n \cdot P(t)}{\int_0^t P(t) \cdot dt},$$

де  $F(t)$  – функція ймовірності відмови:  $F(t) = 1 - P(t)$ .

Таблиця 1. Параметри надійності основних вузлів і деталей СШНУ

№ п/п	Вузол чи деталь СШНУ	Параметри надійності			
		$T_{сер}$	$\beta$	$\eta$	$R$
1	Насосні штанги (млн. циклів): $\sigma_{нр}=50-60$ МПа	10,83	1,09	13,1	0,967
	$\sigma_{нр}=70-90$ МПа	9,72	1,02	11,6	0,973
	$\sigma_{нр}=90-100$ МПа	9,32	0,79	10,5	0,978
	$\sigma_{нр}=110-140$ МПа	5,81	0,66	5,92	0,952
2	Свердловинні насоси (діб): вставні НСВ1Б-32	118	3,37	137	0,930
	НСВ1-32	117	1,87	132	0,970
	НСВ1-38	110	1,67	129	0,940
	НСВ1-43	104	1,55	120	0,990
	НСВ1-56	62	1,35	70	0,960
	невставні НСН2-56	102	2,63	121	0,960
	НСНА-68	84	2,38	94	0,980
НСНА-93	70	1,30	84	0,940	
3	НКТ (діб): до першої відмови	2646	1,89	2987	0,956
	між відмовами при обводненості продукції 40%	1474	0,59	935	0,962
	70%	593	0,96	599	0,959
	90%	389	1,06	399	0,955
4	Канатна підвіска (діб)	1249	1,08	1291	0,993
5	Канат (діб)	1290	1,13	1354	0,994
6	Балансир (діб)	2020	1,04	2065	0,968
7	Палець кривошипа (діб)	1611	1,10	1676	0,993
8	Клинопасова передача (діб)	1381	0,99	1386	0,984

Звідси видно, що при збільшенні інтервалу відновлення  $t$  витрати, викликані аварійними відмовами, зростають, а витрати на профілактику зменшуються. Необхідно вибрати такий інтервал відновлення, який враховує ці дві протилежні (по відношенню до загальних витрат) тенденції. Таким чином, шуканий інтервал відновлення  $t$ , що володіє такою властивістю

$$R(t') = \min R(t), \text{ при } 0 < t < \infty.$$

При цьому  $t'$  є розв'язком рівняння

$$\lambda(t) \int_0^t P(t) dt - F(t) = C / (1 - C) \quad (1)$$

де  $C = C_n / C_a$ .

Застосуємо експоненціальний закон розподілу, для якого

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t > 0, \quad \lambda > 0,$$

де  $\lambda = 1/t_{сер}$ .

Щільність відмов  $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ . Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t) = e^{-\lambda t}$

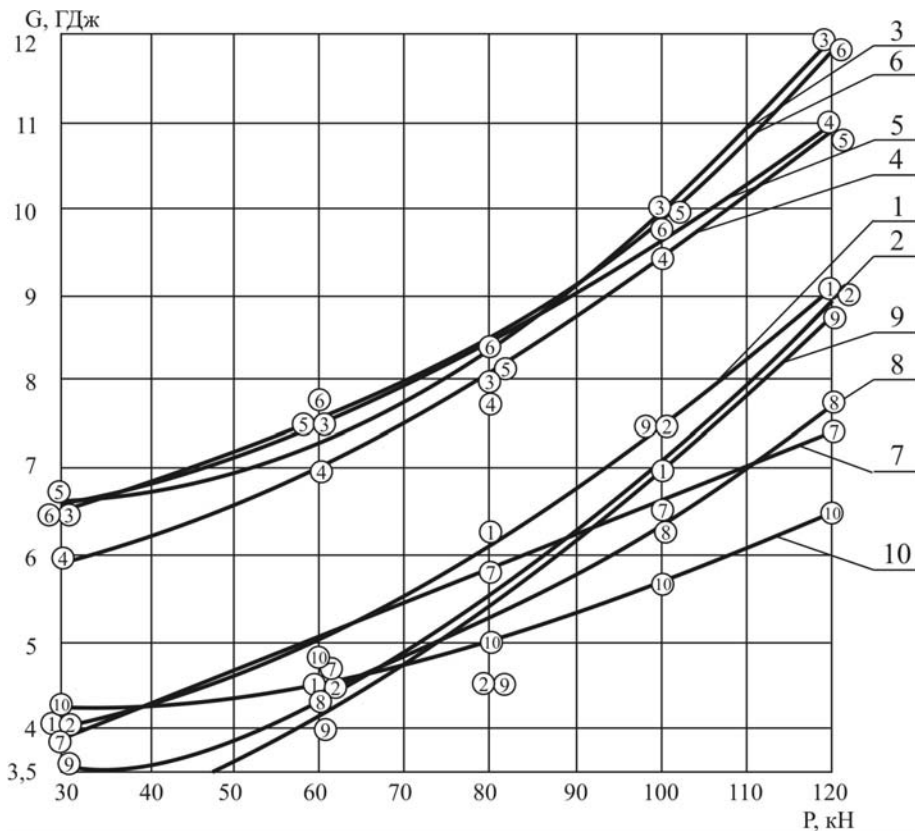
Підставляючи ці дані у формулу (1), одержимо

$$\lambda(t) \int_0^t e^{-\lambda t} dt - e^{-\lambda t} = C/(1-C),$$

$$-2 \cdot e^{-\lambda t} + 1 = C/(1-C),$$

звідки

$$t' = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{1-C/(1-C)}{2}. \quad (2)$$



1 – корпус підшипника; 2 – плашка канатної підвіски; 3 – корпус підшипника;  
4 – вісь балансира; 5 – палець головки; 6 – тіло головки; 7 – шатун;  
8 – гайка (ліва - права); 9 – плашка полірованого штока; 10 – стакан

Рис. 2. Залежності оптимального наробітку вузла чи деталі верстата-гойдалки від навантаження на головку балансира

Визначимо, для прикладу оптимальний інтервал відновлення верстата-гойдалки СК8-3,5-4000 (рис. 3). Підставивши у формулу (2)  $\lambda=1,25 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup> при відношенні  $C=C_n/C_a=1/3$ , отримаємо оптимальний термін (інтервал) відновлення верстата-гойдалки – 1200 год. При цьому  $P(t)$  досягає 0,2-0,22, тобто до 80% вузлів верстата-гойдалки вичерпує свій ресурс.

Міжремонтний період СШНУ можна визначити і графічним методом: по осі абсцис відкладається час (наробіток СШНУ), а по осі ординат – витрати підприємства на поточний і аварійний ремонти та ймовірність відмови насосної установки.

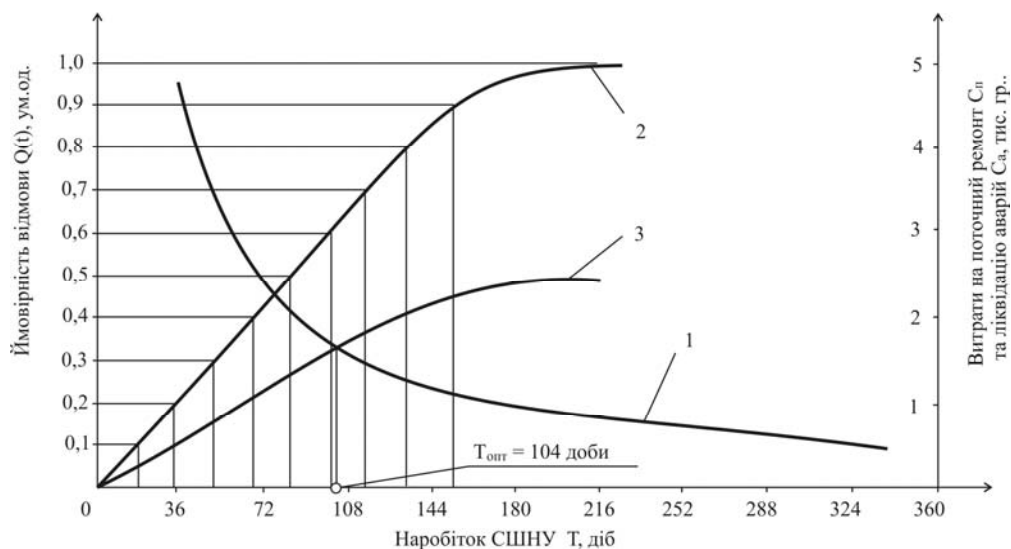


Рис. 3. Знаходження оптимального періоду технічного обслуговування СШНУ

Будуються наступні криві (за даними НГВУ «Долинанафтогаз»):

1 – крива витрат видобувного підприємства на проведення поточного ремонту однієї установки; якщо ремонт здійснюється кожний день, витрати управління складатимуть:

$$W = \frac{T_p}{n},$$

де  $T_p$  – вибраний розрахунковий період тривалістю 365 діб (один рік);  $n$  – періодичність ремонту (через день, через два дні, через три і т.д.);  $T_p/n$  – кількість ремонтів в розрахунковому періоді;  $W$  – середні витрати на проведення одного поточного ремонту.

2 – крива розподілу ймовірності відмови СШНУ в цілому. Для її побудови необхідно знати ймовірність відмови СШНУ при заданому наробітку.

3 – крива витрат на ліквідацію аварій, пов'язаних з відмовою СШНУ. Дану криву можна побудувати двома методами: графічним або розрахунковим.

Графічний метод полягає у проведенні горизонтальних ліній при ймовірності 0.1, 0.2, 0.3 і т. д. до перетину їх з кривою 2. Далі опускаються перпендикуляри через точки перетину. Відповідно на кожному перпендикулярі відкладаємо вартість аварійного ремонту.



Розрахунковий метод проводиться по точках згідно формули

$$W_a = Q(t) \cdot W_{a'},$$

де  $W_{a'}$  – середня вартість ліквідації однієї свердловино-аварії.

Криві 1 та 3 перетинаються. Точка перетину вказує на те, що витрати НГВУ за даного наробітку будуть мінімальними. Отже, в даному випадку технічний огляд СШНУ пропонується проводити через кожних 104 доби експлуатації свердловини, або через кожних 2496 машино-годин.

**Висновки.** Викладені вище методи знаходження оптимального терміну відновлення обладнання дозволяють точніше визначати ресурс роботи нафтогазового обладнання та розробляти раціональну стратегію їх технічного обслуговування і ремонту.

### *Література*

1. Бабаев С.Г. Надежность и долговечность бурового оборудования / С.Г. Бабаев. – М.: Недра, 1974. – 184 с.
2. Литвинов В.М. Повышение надежности нефтепромысловых насосов / В.М. Литвинов. – М.: Недра, 1978.
3. Кіндрачук С.М. Визначення оптимального міжремонтного періоду СШНУ / С.М. Кіндрачук, Б.В. Копей, І.Б. Копей. – ІФДТУНГ, Івано-Франківськ, 1995 -8 с. Деп.в ДНТБ України 25.11.95 – №2490- Ук95.
4. Зазовский Ф.Я. Оценка работы станков-качалок / Ф.Я. Зазовский, Т.И. Солтысяк, Ю.П. Пиксин. – М.,ВНИИОЭНГ, РТСМ: Машины и нефтяное оборудование, 1983. – №11.
5. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.: ил.
6. Драгомирецкий Я.Н. Определение оптимальной величины наработки между отказами деталей нефтепромыслового оборудования / Я.Н. Драгомирецкий, Б.В. Копей, И.Б. Копей // НТЖ «Нефтепромысловое дело». – М.: ВНИИОЭНГ, 1997. – С. 49-56.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 26.12.2017 р.*

*Рекомендовано до друку к.т.н. Онищуком С.Ю..*

*д.т.н., професором Лисканичем М.В.*

---

**RELIABILITY ASSESSMENT OF THE SUCKER ROD PUMPING  
UNIT EQUIPMENT AND DEVELOPMENT OF OPTIMUM  
PLANS-GRAPHICS OF ITS REPAIR****V. V. Lopatin<sup>1</sup>, B. V. Kopey<sup>2</sup>, I. B. Kopey<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Geotechnical Mechanics named after M.S. Polyakov;  
National Academy of Sciences of Ukraine;  
49005, Dnipro-5, str. Simferopolska, 2-a;  
tel. +38 (0562) 46-01-51; e-mail: vlop@ukr.net*

<sup>2</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, str. Carpatska 15;  
tel. +38 (0342) 72-71-01; e-mail: kopeyb@ukr.net*

<sup>3</sup>*PrAT "Ivano-Frankivsk Locomotive Repair Plant";  
76000, Ivano-Frankivsk, str., Zaliznichna, 22;  
tel. +38 (066) 4553886, e-mail: kopeyi@i.ua*

*Maintenance of equipment is possible at known values of work of components to failure or between failures. The task of choosing the value of work is complicated by the fact that the distribution of failures in time is probabilistic. There is the most expedient, optimal value of the work, in which the amount of expenses on the one hand due to the downtime of objects and on the other - due to underutilization of the resource parts and the increase in the number of repairs will be minimal. Method of finding the optimal recovery period for the equipment is proposed in the work and allows more accurately determining the life of the oil and gas equipment and developing a rational strategy for their maintenance and repair.*

**Key words:** *failure, work, resource, equipment, repair.*