

УДК 621.4.192-43.038

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТО І РЕСУРСУ ФОРСУНОК  
ТРАКТОРНИХ ДИЗЕЛІВ**

**Сорокін С.П., канд. техн. наук, Романюк Г.С., канд. техн. наук,  
Курасов Р., Отрода Д., студенти**  
(Харківський національний технічний університет сільського  
господарства імені Петра Василенка)

*У статті на підставі обробки статистичної інформації по параметрам розпилювачів форсунок, що надійшла з експлуатації, визначена оптимальна періодичність технічного обслуговування та ресурс форсунок тракторних дизелів. Використання отриманих даних дозволить забезпечити зниження середньо експлуатаційної витрати палива.*

**Актуальність проблеми.** Найважливішими узагальненими характеристиками якості розпилювача форсунки є ресурс і періодичність технічного обслуговування.

Під ресурсом розуміється його статистична характеристика, що представляє собою величину відрізка часу, протягом якого зберігає працездатність певна частка від вихідної партії розпилювачів. Ця частка прийнята в області тракторної техніки у 85% [2] - так званий гамма - процентний ресурс. У ГОСТі 85 % ресурс встановлений для автотракторних дизелів у 6 тис. мотогодин, як і ресурс форсунок для них, а ресурс розпилювачів дорівнює 0,5 від ресурсу форсунки.

При визначенні ресурсу враховувалися тільки ті відмови, які не можуть бути усунені при технічному обслуговуванні.

Якщо прийняти ту ж відносну частку працездатних розпилювачів у 85 % і враховувати всі види відмов, то відрізок часу, що відповідає вказаній частці представляє ресурс до ТО, тобто його періодичність.

Як доказано у [5] технічний стан розпилювачів визначається їхнім ефективним прохідним перетином  $\mu_f$  і діаметром голки по запірному конусу  $d_x$ .

**Аналіз стану питання.** Методика збору та обробки статистичної інформації для обґрунтування ресурсу та періодичності ТО знайшла своє відображення в роботах [1, 3, 4].

Поряд з очевидними параметрами граничного стану (порушення механічної цілісності деталей, заклинювання голки в корпусі, повне закоксування соплових отворів) можливі випадки, коли параметри граничного стану далеко не очевидні, однак більшість відмов форсунок та їх елементів можна віднести до категорії параметричних [4], тобто обумовлених виходом параметрів, що визначають працездатність, за межі області допустимих значень. Параметричні відмови форсунок не проявляють себе автоматично, а призводять до суттєвого погіршення економічності двигунів,

при цьому подальша експлуатація двигуна є економічно недоцільною.

Дані, представлені в роботі [5], дають підставу зробити висновок, що параметри граничного стану розпилювачів можна розглядати, як параметричні відмови які носять випадковий характер, тоді для встановлення кількісних значень необхідна обробка відповідних статистичних даних, отриманих в результаті спостережень за роботою тракторів в умовах експлуатації.

Відомі три види збору інформації про надійність машин: [3, 4] - під час сезонних робіт за допомогою суцільного хронометражу по невеликій кількості машин; - в експлуатації, періодично, за допомогою статистичного збору інформації по великому числу машин; - за даними сервісних підприємств. Перші два види дозволяють, в основному, отримати дані по експлуатаційним відмовам і рідше - по ресурсним, третій вид, в основному, містить інформацію по ресурсним відмовам і рідше - по експлуатаційним. Вибір способу збору інформації визначається тими завданнями, які повинні бути вирішені в результаті статистичного дослідження та трудомісткістю і можливістю її отримання.

**Викладання основного матеріалу.** Враховуючи те, що в даній роботі ставиться завдання обґрунтувати параметри граничного стану розпилювачів з метою встановлення їхнього справжнього ресурсу та періодичності ТО, то найбільш інформативною може бути інформація, отримана з сервісних підприємств.

Однак, одержувана в результаті однократного контролю інформація не містить даних про напрацювання розпилювачів до їх граничного стану, у зв'язку з тим, що розпилювачі які надходять на ремонтне підприємство, мають різне напрацювання і різний технічний стан, причому граничний стан до надходження в ремонт двигунів у частини розпилювачів може бути не досягнуто.

У загальному випадку вибірка розпилювачів містить напрацювання двох типів [4]:

- до призупинення експлуатації після параметричного відмови  $t_0$ ,
- до призупинення експлуатації без відмови  $t$ .

Напрацювання до моменту контролю, так само як і напрацювання до відмови можуть бути випадковими. Тому обробку статистичної інформації з метою оцінки параметрів передбачуваного закону розподілу найбільш доцільно вести з використанням методу максимальної правдоподібності.

При оцінці параметрів граничного стану прийнято такий стан двигуна, при якому його економічність на номінальному режимі змінюється на величину.

$$\frac{g_e(t) - g_e(t_H)}{g_e(t_H)} < \varepsilon_{X_i} \quad (1)$$

де  $g_e(t_H)$  – ефективна питома витрата палива при номінальному рівні параметра (при  $t_H$ );

$g_e(t)$  – питома витрата палива в момент часу  $t$ ;

$\varepsilon_{X_i}$  – допустимі рівні зниження економічності по  $i$ -му параметру [2].

Обробка чисельної інформації здійснювалася за програмою "Статистика". Методика обробки, що використовувалася, дозволяє вибрати закон розподілу параметру, який найбільше підходить. При цьому порівняння проводиться за параметрами закону Гауса і закону Вейбула-Гнеденко. У результаті порівняння формується гіпотеза про закон розподілу параметрів, що досліджуються.

Перевірка узгодженості емпіричного розподілу з теоретичним проводилася за критерієм Колмогорова.

Розрахунок ресурсу та періодичності технічного обслуговування виконаний за даними вибірки наведеної у попередній роботі [5].

Про розпилювачі, що надійшли в ремонт з двигунами, були відомі тільки марка двигуна та рік випуску розпилювачів, тому було зроблено припущення, що напрацювання розпилювачів на момент обстеження склала кількість років від року випуску до 2013р. включно. При такій оцінці можливі неточності, тому що, відсутні дані про фактичне напрацювання дизелів, з яких зняті обстежувані розпилювачі. Проте великий обсяг вибірки (109 розпилювачів) певною мірою згладжує похибки, що можуть виникнути.

При обробці статистичного матеріалу по параметрам  $d_x$  і  $\mu_f$  з вибірки розпилювачів були виключені ті, у яких  $d_x = 3$  мм. (при роботі форсунки  $d_x$  змінюється тільки в бік зменшення, та такі  $d_x < 2$  мм, яких всього два у виборці).

Як зазначено в роботі [6] при розрахунках є сенс стежити за такими параметрами, які зазнають змін тільки в один бік - в бік зменшення.

З цією метою вводяться в розгляд пов'язані змінні величини  $d_x^1$  та  $\mu_f^1$ , які з часом тільки зростають. А не зменшуються, за допомогою формул, що наведені нижче.

Константи у формулах дорівнюють найбільшому значенню параметрів  $d_x$  і  $\mu_f$  у розглянутій вибірці (3 мм - найбільше значення  $d_x$ ; 0,33 мм<sup>2</sup> - найбільше значення  $\mu_f$ ).

$$d_x^1 = 3.0 - d_x \quad \mu_f^1 = 0.33 - \mu_f \quad (2)$$

Щільність розподілення параметрів при цьому визначається виразом :

$$f(x_i) = \frac{B}{A} \left( \frac{x_i}{F} \right)^{B-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{x_i}{A} \right)^B \right] \quad (3)$$

Функція розподілення:

$$F(x_i) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x_i}{A} \right)^B \right] \quad (4)$$

(для діаметра запирання  $x_i = d_x^1$ , для ефективного прохідного перерізу  $x_i = \mu_f^1$ ).

Вибір параметрів  $A$  і  $B$  розподілу проводиться методом максимальної правдоподібності шляхом вирішення системи рівнянь :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \ln L(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, A)}{\partial A} &= 0 \\ \frac{\partial \ln L(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, B)}{\partial B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рішення системи рівнянь (5) здійснюється наближеним методом (метод Ньютона - Рафсона) [4]. На підставі даних карти атестації проводиться оцінка параметрів  $A$  і  $B$  закону розподілення Вейбула - Гнеденко для вибірок, що відносяться до різних напрацювань (років експлуатації). Перевірка узгодження емпіричних і теоретичних законів проводиться за критерієм Колмогорова [4].

Результати обробки статистичної інформації наведено на рис. 1, рис. 2. У таблиці 1 наведені дані обробки статистичної інформації.

Таблиця 1 – Результати статистического аналізу

Параметр технічного стану	Закон розподення	Параметри закону розподілу		
$d_x^1$	Вейбула - Гнеденко	$A=0,519$ $M(d_x^1)=0,433$	$B=1,551$ $\sigma(d_x^1)=0,257$	$v_{d_x^1}=0,59$
$\mu f^1$	Вейбула - Гнеденко	$A=0,1004$ $M(\mu f^1)=0,1025$	$B=1,721$ $\sigma(\mu f^1)=0,067$	$v_{\mu f^1}=0,65$

У табл. 1 прийняті наступні позначення  $M(x_i)$  – математичне очікування і -го параметру;  $\sigma(x_i)$  – середньоквадратичне відхилення і-го параметру,  $v_{x_i}$  – коефіцієнт варіації.

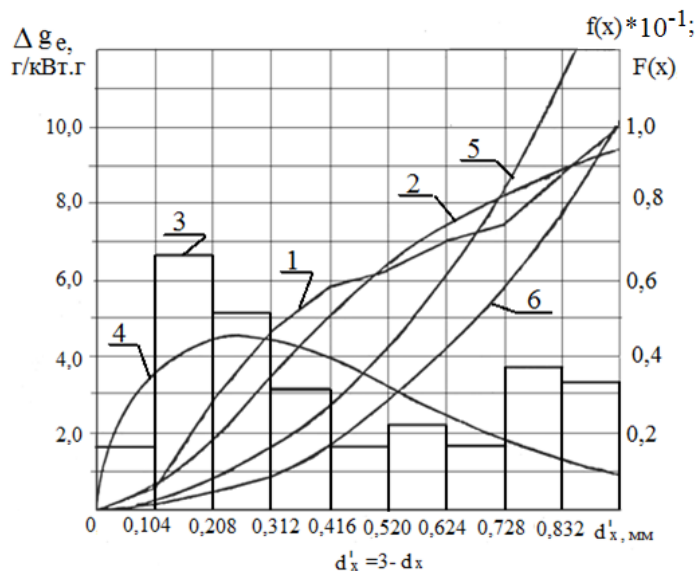


Рисунок 1 – Закон розподілу  $d_x^1$ : 1,2 – емпірична і теоретична функція розподілення; 3,4 – емпірична і теоретична щільність функція розподілення; 5 – відхилення середньо експлуатаційної витрати палива; 6 – відхилення номінальної витрати палива

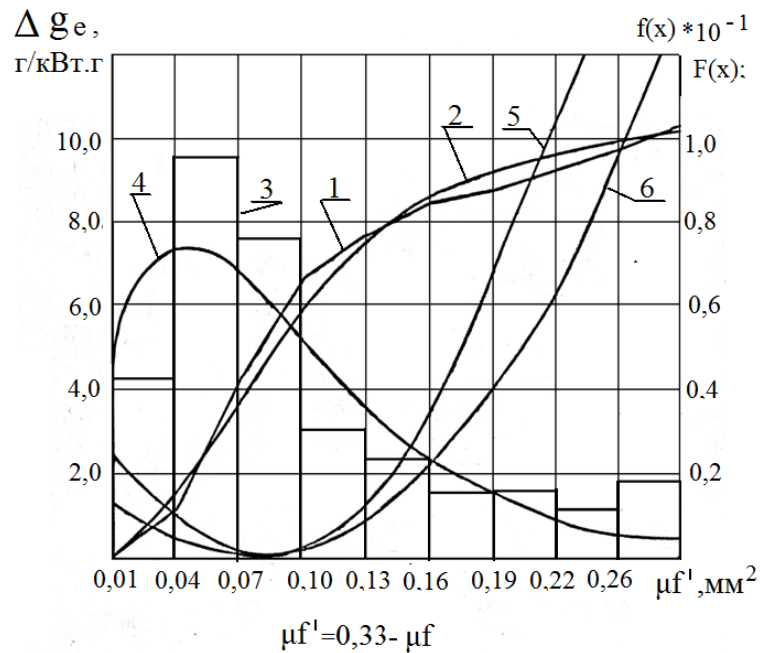


Рисунок 2 – Закон розподілу  $\mu f^1$ : 1,2 емпірична і теоретична функція розподілення; 3,4 – емпірична і теоретична щільність функція розподілення; 5 – відхилення середньо експлуатаційної витрати палива; 6 – відхилення номінальної витрати палива.

Параметри  $dx$  і  $\mu f$  у загальній вибірці розподілені несиметрично, що дало підставу припустити, що й по роках експлуатації вид закону розподілення зберігається. Тому в якості гіпотези про закон розподілення параметрів було також прийнято "гнучкий" двопараметричний закон Вейбула-Гнеденко, який включає два параметри:  $A$  - параметр масштабу,  $B$  - параметр форми.

За отриманими параметрами розподілень побудовані графіки щільності розподілення величин  $f(d_x^1)$  і  $f(\mu f^1)$  для розпилювачів відповідно один, два, три і чотири роки експлуатації.

Результати попереднього розрахунку наведено на рис. 3 та 4.

Нескладно помітити, що параметр форми розподілення " $B$ " не пов'язаний з терміном експлуатації розпилювачів, у зв'язку з цим в подальших розрахунках використовувалося його середнє значення.

Незначний розбіг величини " $B$ " свідчить про подібність процесів і рівність коефіцієнтів варіації параметрів; останнє є критерієм подібності процесів, що відбуваються в різні роки.

З метою забезпечення можливості інтерполяції та екстраполяції отриманих даних був проведений регресійний аналіз зміни параметрів залежно від року експлуатації методом найменших квадратів.

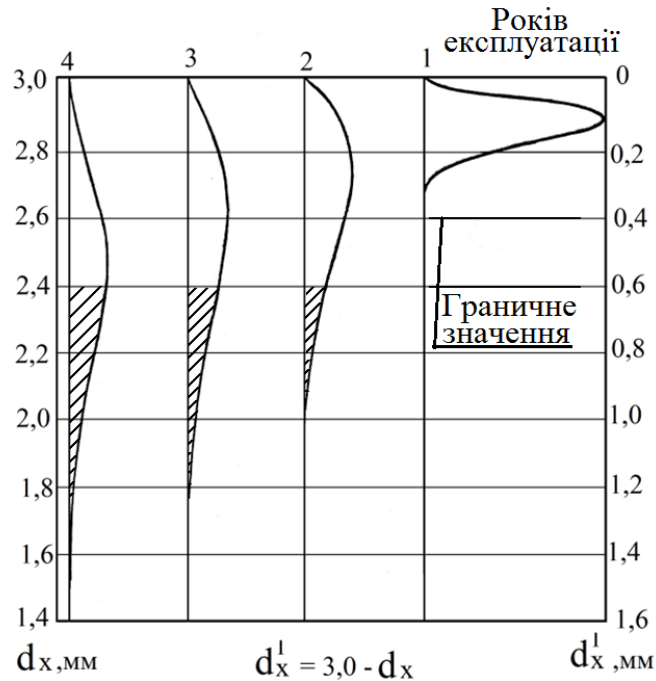


Рисунок 3 – Графік розподілення щільності вірогідності  $d_x$  за роками експлуатації

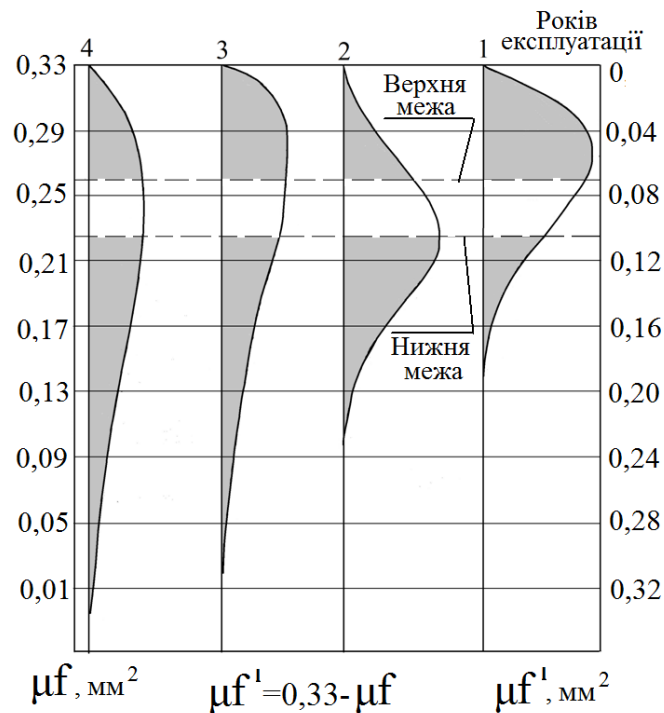


Рисунок 4 – Графік розподілення щільності вірогідності  $\mu_f$  за роками експлуатації

Встановлено, що зміна параметра  $d_x^1$  і його середньо квадратичного відхилення  $\sigma(d_x^1)$  по роках експлуатації може бути з достатньою точністю описано рівняннями (6) і (7).

$$\begin{aligned} d_{x_i}^1 &= 0,3 \cdot \ln(d_x^1) + 0,14, \\ \sigma(d_{x_i}^1) &= 0,15 \cdot \ln[\sigma(d_x^1)] + 0,083. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогічно для параметра  $\mu f^1$  і  $\sigma(\mu f^1)$  отримано:

$$\mu f_i^1 = \frac{\mu f^1}{(5,9 \cdot \mu f^1 + 8,5)},$$

$$\sigma(\mu f_i^1) = 0,015 + 0,02 \cdot (\mu f^1) \quad (7)$$

На підставі отриманих емпіричних виразів за відомими "А" і "В" побудовані графіки щільності розподілення величин  $d_x^1$  та  $\mu f^1$  (рис. 5, 6). Ці графіки певним чином згладжують похибки вихідної інформації.

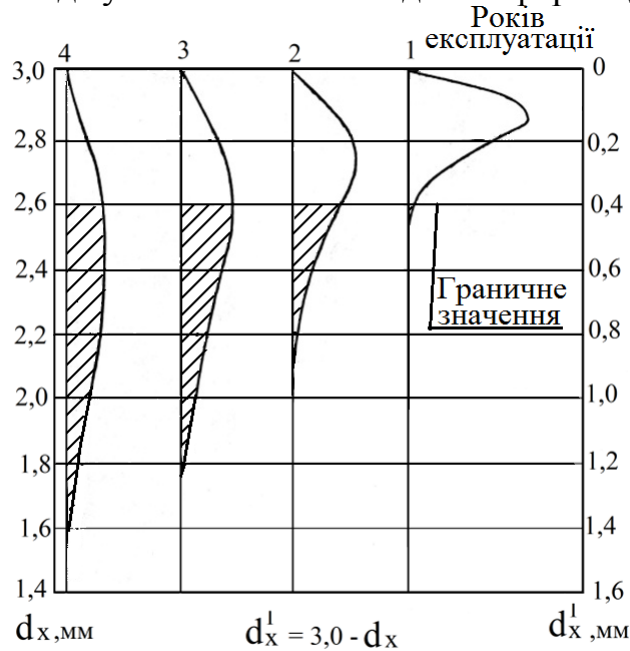


Рисунок 5 – Графік розподілення щільності вірогідності  $d_x^1$  по рокам експлуатації

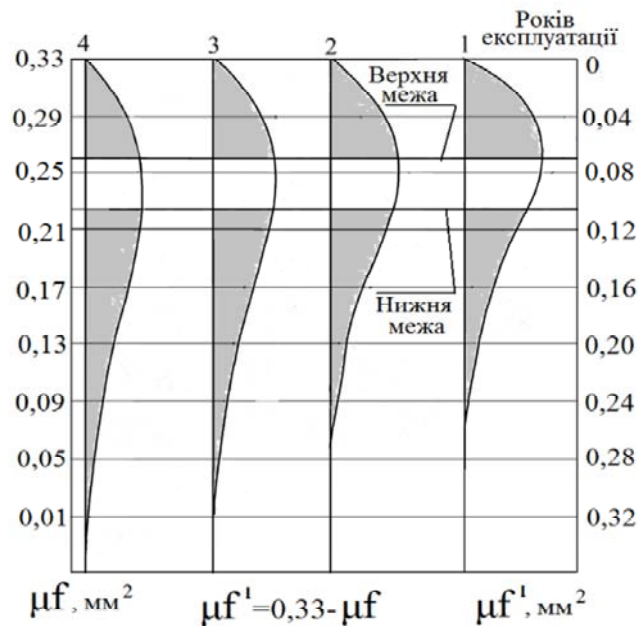


Рисунок 6 – Графік розподілення щільності вірогідності  $\mu f^1$  за роками експлуатації

При певному значенні  $d_x^1$  (а, отже, і  $d_x$ ) показники двигуна не можуть бути відновлені шляхом регулювання форсунки (відновлення тиску початку уприскування), тобто можна вважати, що сталася її відмова.

Використовуючи уточнені розподілення параметрів в експлуатації розраховані графіки ймовірності безвідмовної роботи для 2 -х випадків: 1 ) величини  $d_x^1$  і  $\mu f^1$  незалежні ; 2 ) згадані величини корельовані між собою.

Визначення ймовірності для корельованих величин проводилося за формулою /4/ :

$$r_c = R_1 \cdot R_2 + a_1 \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - R_1) \cdot (1 - R_2)} \quad (8)$$

де  $r_c$  – ймовірність безвідмовної роботи розпилювача;

$R_1$  – ймовірність неперевикнення величиною  $\mu f^1$  заданого граничного значення;  $R_2$  – те ж для величини  $d_x^1$ ;

$\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – відповідно середньоквадратичне відхилення параметрів  $\mu f^1$  і  $d_x^1$ ;

$a_1$  – коефіцієнт регресії , що зв'язує  $\mu f^1$  і  $d_x^1$  .

Вірогідності  $R_1$ ,  $R_2$ , розраховувалися за формулою:

$$R(x_i) = 1 - F(x_i) \quad (9)$$

В силу малості коефіцієнта кореляції між  $\mu f^1$  і  $d_x^1$  її урахування призводить до незначного зміщення графіка, тому без великої похибки кореляцій між величинами і можна знехтувати.

На рис. 7 представлений графік залежності ймовірності безвідмовної роботи в функції терміну експлуатації розпилювача.

Крива ймовірності безвідмовної роботи для однопараметричного обмеження (по  $d_x$ ) дозволяє визначити ресурс розпилювача для будь-якого значення ймовірності безвідмовної роботи, а крива для двопараметричного обмеження (по  $\mu f$  і  $d_x$ ), дозволяє визначити наробіток до ТО, тобто його періодичність.

З графіка (рис. 7) випливає, що при обмеженні  $d_x$  на рівні 2,6 мм , а  $\mu f$  – 0,22 мм<sup>2</sup>, 85 -ти процентному ресурсу відповідає напрацювання в роках – 1,77 і періодичність ТО – 0,43, що при умовному річному напрацюванні трактора в 1200 мотогодин дає значення ресурсу 2130 години і періодичності ТО – 515 годин. Ці цифри відповідають тим граничним значенням  $\mu f$  і  $d_x$  за яких економічність двигуна знижується максимально не більше ніж на 2,5 г/кВт.год. У цьому випадку граничні значення параметрів встановлені, виходячи з того, що при  $d_x \leq 2,6$  економічність двигуна починає істотно погіршуватися, а до цього максимальне погіршення економічності не перевищує 1-1,5 г/кВт год.



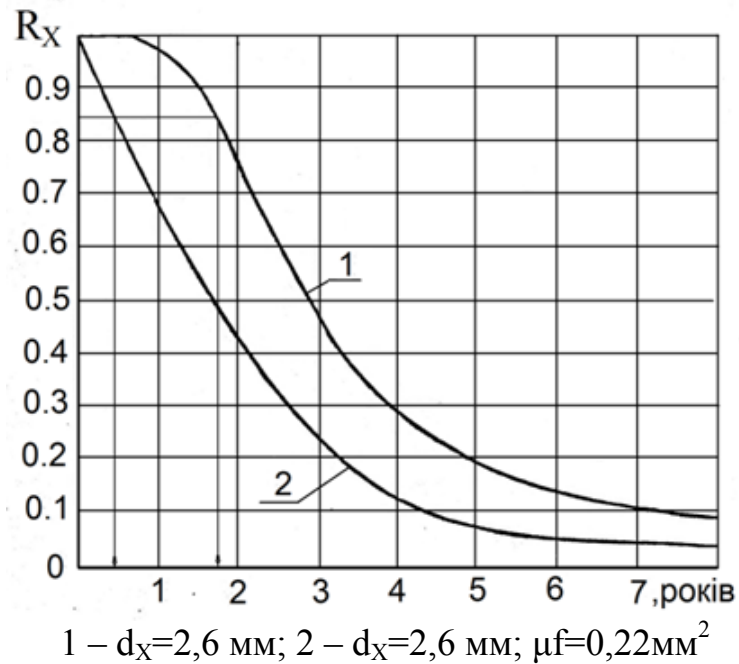


Рисунок 7 – Графік вірогідності безвідмовної роботи розпилювачів в експлуатації

Крім того відомо, що при утворенні на поверхні соплового наконечника розпилювача відкладень коксу цей процес швидко прогресує, і тому, якщо ефективно прохідний перетин розпилювача починає знижуватися, то є підстави стверджувати про початок процесу коксування соплових отворів, тому  $\mu f$  обмежено на рівні  $0,22$  мм<sup>2</sup> ( $\mu f = 0,225-0,260$  мм<sup>2</sup>), а максимальне погіршення економічності не перевищує  $0,5-1,0$  г/кВт.год.

### Висновки

1. Параметром, що визначає ресурс розпилювача тракторної форсунки є діаметр голки по запірному конусу.
2. Параметрами, що визначають періодичність ТО є ефективний прохідний отвір та діаметр голки розпилювача по запірному конусу.
3. Перевірку працездатності форсунок слід проводити при ТО-2 з обов'язковим контролем  $\mu f$  і  $d_x$ .
4. При поточному ремонті дизелів (періодичність 2000 мотогодин) доцільно проводити заміну розпилювачів форсунок.

### Список літератури

1. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин [Текст]. учебное пособие / Ю.В.Баженов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 160 с.
2. ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний.

3. ГОСТ 27.503-81 Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности

4. Прогнозирование надежности тракторов [Текст] / под ред. В.Я. Аниловича. – М.: Машиностроение, 1986 – 222с.

5. Сорокін С.П. Визначення значущості параметрів технічного стану при діагностуванні форсунок дизелів [Текст] / Сорокін С.П., Блінов О.В. // Проблеми технічного сервісу машин: вісник ХНТУСГ. – Вип. 134. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С. 87 – 92.

5. Фельдман Л.Б. Метод выбора критериев предельного состояния распылителей тракторных дизелей [Текст] / Л.Б.Фельдман, П.И. Смолковский, Л.Я.Подольный и др. // Двигателестроение, 1987. – С. 49 – 50.

6. Вентцель В.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / В.С.Вентцель, А.А.Овчаров. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

## Аннотация

### ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТО И РЕСУРСА ФОРСУНОК ТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Сорокин С.П., Романюк Г.С., Курасов Р., Отрода Д.

*В статье на основании обработки статистической информации по параметрам распылителей форсунок, поступившей по эксплуатации, определена оптимальная периодичность технического обслуживания и ресурс форсунок тракторных дизелей. Использование полученных данных позволит обеспечить снижение среднеэксплуатационного расхода топлива.*

## Abstract

### RATIONALE AND RESOURCE FREQUENCY OF THE TRACTOR DIESEL INJECTORS

S. Sorokin, G. Romanyuk, R. Kurasov, D. Otroda

*In the article on the basis of statistical information on the parameters injection nozzles, received instructions, determined the optimal maintenance intervals and service life of tractor diesel injectors. Using the data obtained will allow reduction of average fuel consumption operational.*