

УДК 631.43: 621. 182

**ВПЛИВ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ФОРСУНОК НА ЕКОНОМІЧНІСТЬ ДИЗЕЛЯ**

**Сорокін С.П., к.т.н., доцент, Блінов О., Курасов Р.Л., студенти**  
(Харківський національний технічний університет сільського  
господарства імені Петра Василенка)  
**Грушецький С.М., к.т.н., доцент**  
(Подільський державний аграрно-технічний університет)

*У статті на підставі розрахункового дослідження встановлений рівень можливого збільшення середньоексплуатаційної і номінальної витрати палива двигуном при застосуванні в експлуатації розпилювачів форсунок, параметри технічного стану яких підкоряються встановленим законам розподілення дискретних випадкових величин.*

**Постановка проблеми.** В раніше опублікованій роботі [1] представлений аналіз статистичних характеристик параметрів технічного стану розпилювачів форсунок дизелів, що надійшли на сервісне підприємства для проведення ремонту.

Розрахункові дослідження дозволили встановити основні кількісні характеристики розподілу по кожному з визначальних параметрів ( $d_x$  - діаметра голки по завірному конуса і  $\mu f$  - ефективного прохідного перерізу розпилювача) у вигляді щільності розподілу параметра  $f(x_i)$  та інтегральної оцінки - функції розподілу  $F(x_i)$ .

Виходячи з отриманих результатів виникла необхідність оцінити величину можливого підвищення палива середньо експлуатаційної  $\Delta g_{ee}$  і номінальної  $\Delta g_{en}$  витрати палива при ймовірнісній зміні параметрів технічного стану  $x_i$ .

Задача формулюється так: розрахувати можливе збільшення витрати палива двигуном через не оптимальність параметрів технічного стану форсунок по відомим законам їх розподілу в експлуатації і відомому функціональному зв'язку цих параметрів з питомою витратою палива.

**Аналіз літературних джерел.** Функціональний зв'язок питомої витрати палива з рівнем значення параметра може бути однозначно встановлений за результатами стендових випробувань дизеля. Аналіз даних [1] показав, що якість рівняння функціональної зв'язку може бути вибраний поліном виду:

$$\Delta g_e = a_i \cdot (b - x_i)^{n_i} \quad (1)$$

де: -  $\Delta g_e$  величина збільшення питомої витрати палива при зміні  $i$ -го параметра,  $a_i, n_i, b$  - коефіцієнти рівнянь.

Коефіцієнти визначаються на підставі відомих методів чисельного аналізу. Найбільш підходящим, в даному випадку, є метод найменших квадратів. [2, 3].

Розрахунок коефіцієнтів апроксимуючого рівняння здійснювався виходячи з умови мінімальності квадратичної похибки [3].

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N [\overline{\Delta g_e} - \xi(x_i)] \quad (2)$$

де:  $\varepsilon$  - максимально допустима похибка апроксимації;  $N$  - кількість вимірювань параметрів;  $\overline{\Delta g_e}$  - емпіричне значення приросту питомої витрати палива.

У разі, якщо функція (1) несиметрична, то коефіцієнти відшуковуються окремо для кожної гілки функціональної залежності.

В експлуатації трактор використовується в широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів. При цьому робота двигуна характеризується певним значенням математичного очікування моменту завантаження  $\overline{M}$  і відносної тривалості роботи з цим моментом.

Значення ймовірності для роботи тракторів сільськогосподарського призначення з механічною трансмісією наведені в [4].

Встановлено, що протягом річного циклу робіт, ймовірність роботи на режимі  $N_e / N_n \leq 50\%$  становить 0,465, на режимі  $50\% < N_e / N_n \leq 85\%$  - відповідно 0,330, а при  $N_e / N_n > 85\%$  - 0,215, де  $N_e / N_n$  - відносна завантаження трактора на основних експлуатаційних режимах.

Збільшення середньоексплуатаційної витрати палива  $\Delta g_{ee}$  при однакових рівнях параметрів обчислюється за виразом:

$$\Delta g_{ee} = \sum_{j=1}^K \Delta g_e \cdot P_j \quad (3)$$

де:  $P_j$  - ймовірність роботи в експлуатації режимі  $(N_e / N_n)_j$ .

Для встановлення параметрів функціонального зв'язку  $\Delta g_{ee} = \xi(x_i)$ , використовувалися дані, наведені в [1]. (криві 5, 6 на рис. 1, рис 2).

Методика розрахунку показників параметрів розподілу полягає в тому, що якщо відомий неперервний випадковий параметр  $x_i$  з щільністю розподілу  $f(x_i)$  і рівняння функціонального зв'язку зміни витрати палива з цим параметром, то щільність розподілу середньоексплуатаційної витрати обчислюється за формулою:

$$f(\Delta g_{ee}) = f(x_i) \cdot \left| \frac{dx_i}{d\Delta g_{ee}} \right| \quad (4)$$

Зазвичай залежність (4) розглядають у вигляді:

$$f(\Delta g_{ee}) = \varphi(\Delta g_{ee}) \cdot \left| \frac{d\varphi(\Delta g_{ee})}{d\Delta g_{ee}} \right| \quad (5)$$

де:  $f(\Delta g_{ee})$  - щільність ймовірності зміни  $\Delta g_{ee}$  в експлуатації;  $\varphi(\Delta g_{ee})$  - зворотна функція  $\Delta g_{ee} = \xi(x_i)$ .

Вирази (4 і 5) справедливі у випадку, якщо функція  $\xi(x_i)$  в області можливих значень неперервна і монотонна (для  $\xi(d_x)$ ).

Для немонотонної або для неоднозначної функції  $\xi(x_i)$  (для  $\xi(\mu f)$ ) обчислювалася за формулою:

$$f(\Delta g_{ee}) = \varphi_1(\Delta g_{ee}) \cdot \left| \frac{d\varphi_1(\Delta g_{ee})}{d\Delta g_{ee}} \right| + \varphi_2(\Delta g_{ee}) \cdot \left| \frac{d\varphi_2(\Delta g_{ee})}{d\Delta g_{ee}} \right| \quad (6)$$

Для прийнятого виду функціональних зв'язків зворотні функції та їх похідні визначалися з виразів:

$$x_i = B \pm \sqrt[n_i]{\frac{\Delta g_{ee}}{a_i}} \quad (7)$$

$$\varphi_i^1(\Delta g_{ee}) = \pm \left( \frac{1}{a_i} \right)^{\frac{1}{n_i}} \cdot \frac{1}{n_i} \cdot \frac{1}{\sqrt[n_i]{(\Delta g_{ee})^{n_i-1}}} \quad (8)$$

Підставляючи у вирази (4 і 5) або (6) значення показників розподілу досліджуваного параметра  $x_i$  і значення похідних з виразу (8), визначають щільність розподілу  $\Delta g_{ee}$  по  $i$ -му параметру з урахуванням статистичних характеристик розподілу параметра.

При визначенні функції розподілу  $F(x_i)$  виходять з умови знаходження величини в заданому інтервалі  $x_{i1} > x_i > x_{i2}$  в області її можливих значень.

У цьому випадку функція розподілу ймовірності  $\Delta g_{ee}$ , при  $0 < \Delta g_{ee} < \Delta g_{ee\max}$  визначається інтегруванням виразів (4 і 5).

$$F(x_i) = \int_0^{\Delta g_{ee\max}} f(\Delta g_{ee}) \cdot d\Delta g_{ee} \quad (9)$$

Таким чином за відомими законами розподілу параметрів технічного стану розпилювачів форсунок можна провести оцінку закону розподілу збільшення витрати палива  $\Delta g_{ee}$ .

Аналогічним чином проводиться оцінка і по зміні питомої ефективної витрати  $\Delta g_{ен}$ . В цьому випадку розрахунок ведуть за функціональним зв'язком  $\Delta g_{ен} = \xi_1(x_i)$ .

**Результати розрахункового дослідження.** Введення в розгляд умовних параметрів  $d_x^1$  и  $\mu f^1$  [1] (параметри змінюються в одному напрямку – тільки

зменшуються) обумовило необхідність встановлення параметрів функціонального зв'язку  $\Delta g_{ei} = \xi(x_i)$  для нових змінних.

З урахуванням цього за вищенаведеною методикою були отримані формули для підрахунку щільності ймовірності по кожному з параметрів.

По параметру  $d_x^1$  функціональний зв'язок монотонний і однозначний, закон розподілу  $f(d_x^1)$ - Вейбула-Гнеденко:

$$f(\Delta g_{ei}) = \left(\frac{1}{a_1}\right)^{\frac{1}{n_1}} \cdot \frac{1}{n_1 \cdot \sqrt[n_1]{(\Delta g_{ee})^{n_1-1}}} \cdot \frac{B}{A} \cdot \left(\frac{B + n_1 \sqrt[n_1]{\Delta g_{ei}/a_1}}{A}\right)^{B-1} \times \\ \times \exp\left[-\left(\frac{B + n_1 \sqrt[n_1]{\Delta g_{ei}/a_1}}{A}\right)^B\right] \quad (10)$$

- По параметру  $\mu f^1$  функціональний зв'язок немонотонний, закон розподілу  $f(\mu f^1)$ - Вейбула-Гнеденко:

$$f(\Delta g_{ei}) = \frac{B}{A} \cdot \left\{ \left(\frac{1}{a_2}\right)^{\frac{1}{n_2}} \cdot \frac{1}{n_2 \cdot \sqrt[n_2]{(\Delta g_{ee})^{n_2-1}}} \cdot \left(\frac{B + n_2 \sqrt[n_2]{\Delta g_{ei}/a_2}}{A}\right)^{B-1} \times \right. \\ \times \exp\left[-\left(\frac{B + n_2 \sqrt[n_2]{\Delta g_{ei}/a_2}}{A}\right)^B\right] + \left(\frac{1}{a_1}\right)^{\frac{1}{n_1}} \cdot \frac{1}{n_1 \cdot \sqrt[n_1]{(\Delta g_{ei})^{n_1-1}}} \times \\ \left. \times \left(\frac{B + n_1 \sqrt[n_1]{\Delta g_{ei}/a_1}}{A}\right)^{B-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{B + n_1 \sqrt[n_1]{\Delta g_{ei}/a_1}}{A}\right)^B\right] \right\} \quad (11)$$

В рівнянні (10) (11) коефіцієнти з індексом 1 відносяться до монотонно зростаючого функціонального зв'язку, з індексом 2 – до спадаючого.

Значення коефіцієнтів функціонального зв'язку а також параметри законів розподілу  $d_x^1$  та  $\mu f^1$  для середньоексплуатаційної і номінального витрат палива наведено в табл. 1. Так само в таблиці наведені дані аналізу усічених вибірок. За отриманими виразами була розроблена програма розрахунку параметрів функції розподілу за відомими параметрами розподілу аргументу і відомому вигляді функціональної зв'язку.

Згідно розробленого алгоритму обчислення функції щільності розподілу  $f(\Delta g_{ei})$  здійснювалося за виразами 10 або 11. Функція розподілу підраховувалася методом наближеного інтегрування величини щільності

функції розподілу. При цьому прийнято, що при  $\Delta g_{ei} < 0$ ,  $F(\Delta g_{ei}) = 0$ . Значення функції розподілу в точці  $i=1$  обчислювалося за формулою:

$$F(\Delta g_{ei+1}) = F(\Delta g_{ei}) + R(\Delta g_{ei} \leq \Delta g_e \leq \Delta g_{ei+1}) \quad (12)$$

де:  $R(\Delta g_{ei} \leq \Delta g_e \leq \Delta g_{ei+1})$  ймовірність потрапляння питомої ефективної витрати палива в інтервал  $[\Delta g_{ei} \dots \Delta g_{ei+1}]$ , яка може бути наближено розрахована за виразом:

$$R(\Delta g_{ei} \leq \Delta g_e \leq \Delta g_{ei+1}) = \frac{f(\Delta g_{ei}) + f(\Delta g_{ei+1})}{2} \cdot \Delta g \quad (13)$$

де:  $\Delta g$  - крок рахунку.

Математичне очікування збільшення питомої витрати палива обчислювалося за формулою:

$$M(\Delta g_{ei}) = \sum_{i=1}^n \Delta g_{ei} \cdot R(\Delta g_{ei} \leq \Delta g_e \leq \Delta g_{ei+1}) \quad (14)$$

а середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$\sigma(\Delta g_{ei}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [\Delta g_{ei} - M(\Delta g_{ei})]^2 \cdot \Delta g} \quad (15)$$

Попередні розрахунки показали, що для прийнятної точності обчислень крок рахунку  $\Delta g$  повинен бути в межах (0,001-0,05)г/кВт г. Ознакою кінця рахунку за програмою була величина максимального збільшення питомої витрати палива, яка в даному випадку приймалася на рівні 15 г/кВт. г.

Вихідні дані для розрахунку і результати розрахунку для наочності наведено в табл. 1

На рис.1 і рис. 2 наведено графічне відображення результатів розрахунку по параметрам  $d_x$  и  $\mu f$

Рис. 1а та 1в ілюструють оцінку за середньоексплуатаційною витратою, рис. 1б і 1г - за номінальною витраті.

Встановлено, що найбільш істотний вплив на економічність двигуна чинить діаметр запирання  $d_x$  (рухливість голки форсунки). Погіршення питомої витрати палива становить: при оцінці по  $\Delta g_{ee}$  - 2,7 г/кВт.г., при оцінці по  $\Delta g_{en}$  - 3,5 г/кВт.г. Вплив  $\mu f$  на економічність дизеля менш суттєвий і становить відповідно - 1,6 і 2,1 г/кВт.г.

Загальне погіршення економічності при експлуатації дизеля через не оптимальність параметрів технічного стану розпилувачів форсунок може бути обчислено за формулою [3].

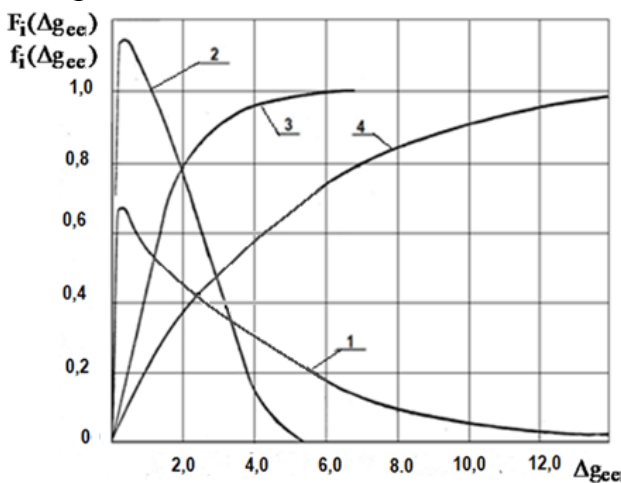
$$M(\Delta g_{ee})_{\Sigma} = M \left[ \sum_{i=1}^2 \Delta g_{ei} \right] = \sum_{i=1}^2 M(\Delta g_{ei}) \quad (16)$$

Формула (16) справедлива як для залежних, так і не залежних величин (а також корельованих і не корельованих).

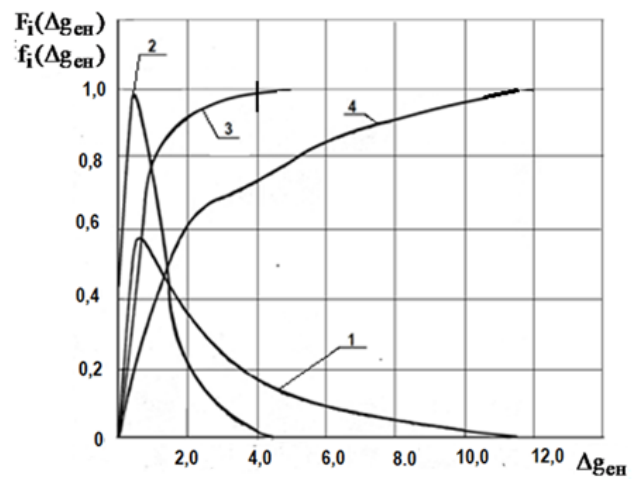
Таблиця 1 – Вихідні дані і результати розрахунку

Параметр ТС		Вихідні дані									Результати розрахунку	
		Коефіцієнт функціонального зв'язку					Параметри розподілу аргументу					
		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	B	B	A	M(x <sub>i</sub> )	σ(x <sub>i</sub> )		
d <sub>x</sub> <sup>1</sup>	Екс.	11,6	-	2,2	-	-	1,72	0,519	0,433	0,257	2,715	8,335
	Ном.	15,9	-	2,0	-	-	1,72	0,519	0,433	0,257	3,527	9,744
	У. екс.	11,6	-	2,2	-	-	-	-	0,235	0,116	0,675	0,773
	У. ном.	15,6	-	2,0	-	-	-	-	0,235	0,116	1,137	1,418
μf <sup>1</sup>	Екс.	184	1090	1,68	2,74	0,09	1,551	0,100	0,103	0,067	1,643	7,109
	Ном.	408	386	1,80	2,00	0,09	1,551	0,100	0,103	0,067	2,130	9,100
	У. екс.	184	1090	1,68	2,74	0,09	-	-	-0,021	0,03	0,253	0,444
	У. ном.	408	396	1,80	2,00	0,09	-	-	-0,021	0,03	0,607	1,094

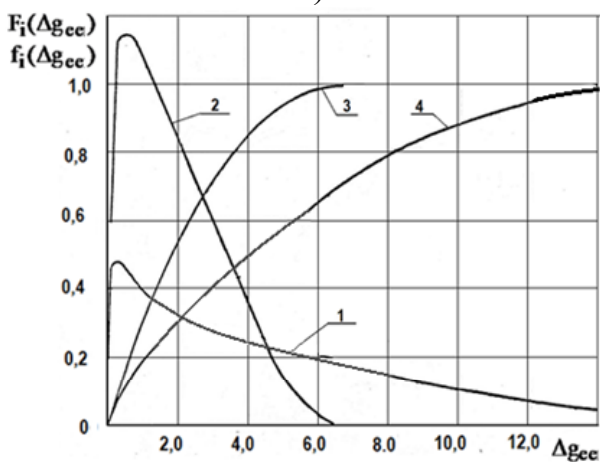
Примітка: Екс. – оцінка за середньо експлуатаційною витратою палива по повній виборці; Ном. – оцінка за номінальною витратою палива по повній виборці; У. екс. – оцінка за середньо експлуатаційною витратою палива по усіченій виборці; У. ном. – оцінка за номінальною витратою палива по усіченій виборці.



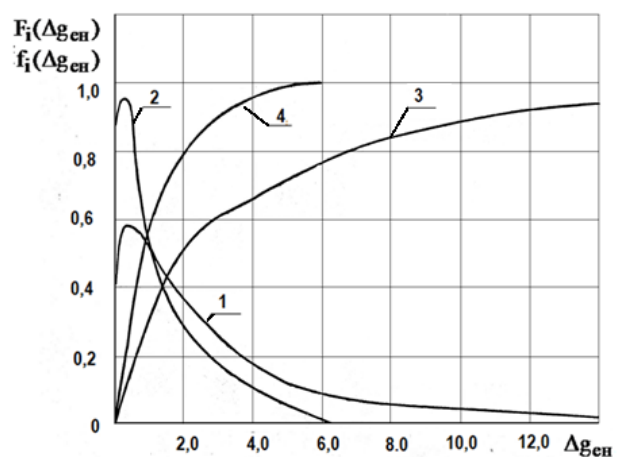
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Закон розподілення Δg<sub>ei</sub> по параметрам d<sub>x</sub> [ а) в) ] та μf [ б) г) ]



Результати підрахунку за формулою (16) показують, що погіршення середньоексплуатаційної витрати палива через не оптимальності параметрів технічного стану розпилювачів форсунок тракторних дизелів при ймовірнісному розподілі параметрів в умовах експлуатації становить:

$$M(\Delta g_{ee})_{\Sigma} = 2,751 + 1,643 \approx 4,4 \text{ г/кВт.г.}$$

При оцінці по номінальній витраті палива:

$$M(\Delta g_{en})_{\Sigma} = 3,527 + 2,1320 \approx 5,6 \text{ г/кВт.г.}$$

Як було зазначено в [1] граничні значення параметрів технічного стану форсунок характеризуються величинами: 2,5 мм по параметру  $d_x$  і 0,18 мм<sup>2</sup> - за параметром  $\mu f$ . Завдання системи технічного обслуговування - не допустити роботу двигуна в експлуатації з параметрами  $d_x$  та  $\mu f$  що мають значення нижче вказаних меж.

Це може бути забезпечено, якщо проводити ТО форсунок відповідно до рекомендацій, викладених у [1].

Економічна ефективність запропонованих заходів оцінювалася шляхом проведення розрахунку для деякої усіченої вибірки.

Нова вибірка утворена в припущенні, що в результаті удосконалення системи ТО з експлуатації будуть повністю вилучені, ті розпилювачі, параметри технічного стану яких виходять за граничні значення, тобто з повної вибірки видалені розпилювачі, у яких  $d_x < 2,5 \text{ мм}$ .  $\mu f < 0,18 \text{ , мм}^2$ .

В результаті розрахунків, проведених аналогічно, як і для повної вибірки встановлено, що розподіл параметрів може бути з достатньою точністю оцінено за параметрами нормального розподілу. Числові характеристики розподілів наведені у табл. 2.

Як видно з даних таблиці, впровадження запропонованих заходів дозволяє істотно знизити коефіцієнт варіації параметрів а, отже, забезпечити звуження можливого інтервалу варіювання параметрів в експлуатації.

Таблиця 2 – Характеристики розподілу усічених вибірок

Параметр	Закон розподілу	$M(x_i)$	$\sigma(x_i)$	$v(x_i)$
$d_x^1$	нормальний	0,235	0,116	0,49
$\mu f^1$	нормальний	0,069	0,029	0,43

Розрахунок можливого збільшення питомої витрати палива для обмежених параметрів проводився за вищенаведеною методикою. Коефіцієнти у виразах функціонального зв'язку прийняті такими, як і для повної вибірки. Закони розподілу параметрів центрувались відносно точки  $\Delta g_e = 0$ .

### Висновки.

Для усічених вибірок при оцінці за середньоексплуатаційною витратою палива величина математичного очікування його погіршення становить:  $M(\Delta g_{ee})_{\Sigma} = 0,657 + 0,253 \approx 0,9 \text{ г/кВт.г.}$  При оцінці по номінальній витраті:

$M(\Delta g_{\text{ен}})_{\Sigma} = 1,137 + 0,607 \approx 1,7 \text{Г/кВт.г.}$  Загальна можлива економія палива складає при оцінці за середньоексплуатаційною витратою:  $\Delta g_{\text{еє}} = 4,4 - 0,9 = 3,5 \text{Г/кВт.г.}$  При оцінці за номінальною витратою:  $\Delta g_{\text{ен}} = 5,6 - 1,7 = 3,9 \text{Г/кВт.г.}$

### Список використаних джерел

1. Сорокін С.П. Обґрунтування періодичності то і ресурсу форсунок тракторних дизелів. [Текст] / Сорокін С.П., Романюк Г.С., Курасов О., ОтродаД.// Технічний сервіс машин для рослинництва: Вісник ХНТУСГ. – Вип. 145. – Харків: ХНТУСГ, 2014. – С. 179-188.
2. Тарасов В.Н. Численные методы. Теория, алгоритмы, программы / В.Н.Тарасов, Н.Ф. Бахарева. – Оренбург: ИПК ОГУ, 2008. –264 с.
3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. –М.: Вышшая школа, 1980. – 224 с.
4. Методика определения оценочного удельного расхода топлива двигателей тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин./НИИКТИД. Владимир, 1991. – 18 с.

### Аннотация

#### ВЛИЯНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФОРСУНОК ДИЗЕЛІВ НА ЕКОНОМІЧНОСТЬ ДИЗЕЛЯ

Сорокин С.П., Грушецкий С.Н., Блинов О., Курасов Р.Л.

*В статье на основании расчетного исследования установлен уровень возможного увеличения среднеэксплуатационного и номинального расхода топлива двигателем при использовании в эксплуатации распылителей форсунок, параметры технического состояния которых подчиняются установленным законам распределения дискретных случайных величин.*

### Abstract

#### THE INFLUENCE OF THE GOVERNING PARAMETERS OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE INJECTORS DIESELS ON ECONOMET DIESEL

S. Sorokin, S. Hrushetskyi, O. Pancakes, P. Kurasov

*In article on the basis of the design of the study level is set to the possible increase in sredneekspluatatsionnaja and the nominal engine fuel consumption when used in operation of the spray nozzles, the parameters of the technical condition which obey the established laws of distribution of discrete random variables.*