

ВИЗНАЧЕННЯ ЗОВНІШНІХ ШВИДКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО
ОБЛАДНАННЯ ДОРОЖНІХ МАШИНDETERMINATION OF THE EXTERNAL SPEED CHARACTERISTICS OF THE POWER
EQUIPMENT OF ROAD MACHINES

Мороз Валентин Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, кафедра інженерії машин транспортного будівництва, доцент, frostvaliko@gmail.com, +38044 280 97 73, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226.,

<https://orcid.org/0000-0003-3000-4961>



Ковбасенко Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, професор кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, кафедра інженерії машин транспортного будівництва, професор, svkovsv@gmail.com, +38044 280 97 73, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226.,

<https://orcid.org/0000-0002-7309-8200>



Левківський Сергій Анатолійович, старший викладач кафедри інженерії машин транспортного будівництва, Національний транспортний університет, s.a.levkovsky@gmail.com, +38044 280 97 73, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 226.,

<https://orcid.org/0000-0003-1515-4240>

Анотація. В роботі розглядається питання по визначенню паливної економічності і токсичності відпрацьованих газів силового обладнання дорожніх машин, які працюють у тягових режимах, а саме плужних і плужнощіткових снігоочисників на базі пневмоколісного трактора.

Об'єкт дослідження – паливна економічність і токсичність відпрацьованих газів силового обладнання.

Мета дослідження полягає в експериментальному визначенні зовнішніх швидкісних характеристик дизеля 4Ч11,0/12,5 (сімейства Д-240, Д-241, Д-242, Д-243), а саме: максимальної потужності N_e , максимального крутного моменту M_k ; годинних витрат палива $G_{\text{пал}}$ і повітря $G_{\text{пов}}$, питомої ефективної витрати палива g_e ; концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах: оксиду вуглецю CO , вуглеводневих сполук C_mH_n , оксидів азоту NO_x та димності N відпрацьованих газів.

В роботі наводяться результати експериментальних досліджень по визначенню енергетичних показників (максимальної потужності N_e і максимального крутного моменту M_k) дизеля (4Ч11,0/12,5 (Д-242)) силового обладнання; показників паливної економічності (годинної витрати палива $G_{\text{пал}}$ і питомої ефективної витрати палива g_e); годинної витрати повітря $G_{\text{пов}}$; концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах: оксиду вуглецю CO , вуглеводневих сполук C_mH_n , оксидів азоту NO_x та димності N відпрацьованих газів. Які отримані при положенні органу керування паливоподачею, що

відповідає максимальній подачі палива від частоти обертання колінчастого валу дизеля. Вище зазначені показники визначались за стандартних налаштувань коректора паливоподачі дизеля.

За отриманими зовнішніми швидкісними характеристиками N_e , M_k , $G_{\text{пал}}$, g_e , $G_{\text{пов}}$, CO , C_mH_n , NO_x і N було визначено математичні (поліноміальні) залежності, що їх описують від частоти обертання колінчастого валу дизеля, а також перевірено їх адекватність.

Проведені дослідження дозволили визначити основний напрямок підвищення паливної економічності і зниження викидів шкідливих речовин дизеля.

Ключові слова: Зовнішні швидкісні характеристики, енергетичні і екологічні показники, паливна економічність, шкідливі речовини, відпрацьовані гази, поліноміальні моделі, адекватність.

Вступ

Постановка проблеми. Для виконання робіт по літньому і зимовому утриманню автомобільних доріг, а також для їх ремонту застосовуються різні види дорожніх машин. Це насамперед поливально-мийні, підмітально-прибиральні машини, плужні і роторні снігоочисники та дорожні фрези і асфальторозігрівачі. Для виконання цих робіт в якості базових тягачів застосовуються вантажні автомобілі середньої вантажопідйомності, пневмоколісні і гусеничні трактори.

На підприємствах, що займаються експлуатацією цих машин достатньо багато міститься пневмоколісних тракторів сімейства МТЗ-80 і МТЗ-82, з дизелями сімейства Д-240, Д-241, Д-242, Д-243 (4Ч11,0/12,5). Оскільки дорожні машини (плужні і роторні снігоочисники), працюють у тяговому режимі значний період свого часу, то відповідно і їх дизелі працюють більшу частину часу у номінальному режимі (граничному швидкісному режимі, при якому дизель працює за зовнішньою швидкісною характеристикою [1]). Для цього режиму роботи характерна підвищена витрата палива.

Тому доцільно буде визначити паливну економічність та екологічні показники дизеля базового тягача за роботи у вище наведеному режимі.

Аналіз останніх досліджень. В технічному описанні і інструкції з експлуатації дизелів сімейства 4Ч11,0/12,5 [2] наводяться загальні їх характеристики такі як: потужність номінальна, потужність експлуатаційна, номінальна частота обертання, максимальна частота обертання холостого ходу, що обмежується регулятором, максимальне значення крутного моменту, частота обертання при максимальному крутному моменті, питома витрата палива в режимі номінальної потужності, питома витрата палива в режимі експлуатаційної потужності.

Автори роботи [3] наводять результати експериментальних випробувань по визначенню зовнішніх швидкісних характеристик дизеля Д-50 по визначенню питомої ефективної витрати палива g_e , ефективного крутного моменту M_k , годинної витрати палива $G_{\text{пал}}$ і ефективної потужності N_e від частоти обертання колінчастого валу двигуна. Також автори наводять характеристику холостого ходу дизеля ЯМЗ-236 по визначенню годинних витрат палива і повітря відповідно $G_{\text{пал}}$ і $G_{\text{пов}}$, коефіцієнту надміру повітря α і коефіцієнту наповнення η_v в залежності від частоти обертання колінчастого валу. Тут же наводяться і результати отриманої характеристики токсичності дизеля РАБА-MAN при частоті обертання колінчастого валу дизеля 2000 хв⁻¹, яка визначає концентрації шкідливих речовин (ШР) у відпрацьованих газах (ВГ) дизеля таких як: монооксиду вуглецю CO , двооксиду вуглецю CO_2 , оксидів азоту NO_x , вуглеводневих сполук C_mH_n , димності ВГ K і коефіцієнту надміру повітря α .

В джерелі [4] наводяться результати навантажувальної характеристики дизеля 4Ч11,0/12,5 (Д-243) при частоті обертання колінчастого валу дизеля 1500 хв⁻¹, яка визначає концентрації ШР у ВГ дизеля таких як: монооксиду вуглецю CO , двооксиду вуглецю CO_2 , оксидів азоту NO_x , вуглеводневих сполук C_mH_n , димності ВГ K , а також годинної $G_{\text{пал}}$ і питомої g_e витрат палива та температури відпрацьованих газів $t_{\text{вг}}$.

В роботі [5] наводяться результати навантажувальної характеристики дизеля 4Ч11,0/12,5 (Д-243) при частоті обертання колінчастого валу дизеля 1850 хв⁻¹, яка визначає концентрації ШР у ВГ дизеля таких як: монооксиду вуглецю CO , оксидів азоту NO_x , вуглеводневих сполук C_mH_n , димності ВГ K , твердих часток S , а також годинних витрат палива $G_{\text{пал}}$ і повітря $G_{\text{пов}}$.

Мета роботи полягає в експериментальному визначенні зовнішніх швидкісних характеристик дизеля 4Ч11,0/12,5 (сімейства Д-240, Д-241, Д-242, Д-243), а саме: максимальної потужності N_e , максимального крутного моменту M_k ; годинних витрат палива $G_{\text{пал}}$ і повітря $G_{\text{пов}}$, питомої ефективної витрати палива g_e ; концентрацій ШР у ВГ: оксиду вуглецю CO , вуглеводневих сполук C_mH_n , оксидів азоту NO_x , та димності N ВГ.

Загальні положення

Основна частина. Для оцінки екологічних показників та паливної економічності дизеля 4Ч11,0/12,5 (Д-243) було визначено, під час стендових досліджень, зовнішні швидкісні характеристики, які відповідають найбільш характерним режимам роботи двигуна при роботі машини у тяговому режимі (режим роботи плужного снігоочисника). Отримані в результаті експерименту максимальна потужність N_e та максимальний крутний момент M_k відповідають значенням для дизеля Д-242, наведеним в [2].

На рис. 1 показано зовнішні швидкісні характеристики. На цьому рисунку показано отримані в залежності від частоти обертання колінчастого валу дизеля n такі показники: витрати палива і повітря за годину ($G_{\text{пал}}$ і $G_{\text{пов}}$), питома ефективна витрата палива g_e , циклової подачі палива $q_{\text{ц}}$ і коефіцієнту наповнення η_v ; концентрації в відпрацьованих газах оксиду вуглецю CO , вуглеводнів C_mH_n , оксидів азоту NO_x ; димності відпрацьованих газів N та коефіцієнта надміру повітря α .

З використанням методу математичного планування експерименту [6] за визначеними зовнішніми швидкісними характеристиками було описано поліноміальними залежностями показники двигуна (витрату палива $G_{\text{пал}}$, витрату повітря $G_{\text{пов}}$; з ВГ концентрації ШР в ВГ: оксидів азоту NO_x , вуглеводневих сполук C_mH_n , оксиду вуглецю CO та димності N ВГ).

За рівномірним варіантом плану повного факторного експерименту визначались значення параметрів у заданих точках плану [6]. З використанням методу найменших квадратів [6], використовуючи спеціальне програмне забезпечення на ПЕОМ визначались коефіцієнти поліноміальних залежностей для швидкісних режимів роботи. Для описання показників дизеля використовувались квадратичні поліноміальні залежності вигляду:

$$y = A_0 + A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2^2 \quad (1)$$

де A_0, A_1, A_2 – поліноміальні коефіцієнти;
 x_1, x_2 – незалежні параметри.

Показники дизеля за зовнішніми швидкісними характеристиками описані поліноміальними залежностями другої степені від частоти обертання колінчастого валу двигуна n , які мають наступний вигляд:

Годинна витрата повітря (кг/год) визначається за залежністю:

$$G_{\text{пов}} = 200,724 + 0,16 \cdot (n - 1500) + 2,889 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1500)^2 \quad (2)$$

Годинна витрата палива (кг/год) визначається за залежністю:

$$G_{\text{пал}} = 9,31 + 2,726 \cdot 10^{-2} \cdot (n - 1500) - 4,2 \cdot 10^{-4} \cdot (n - 1500)^2 \quad (3)$$

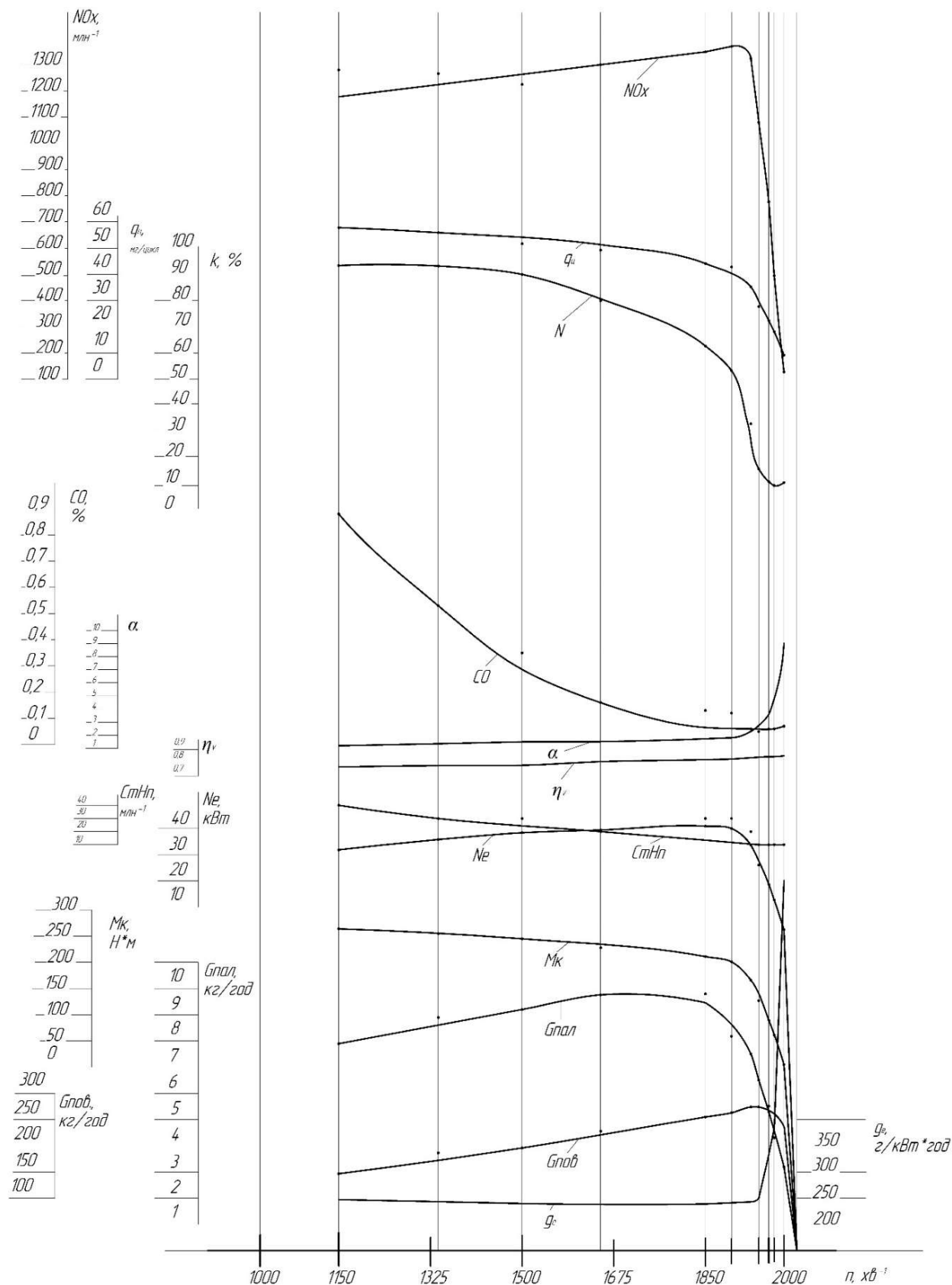


Рисунок 1 – Зовнішня швидкісна характеристика дизеля 4Ч11,0/12,5 (D-242)
 Figure 1 – External speed characteristic of diesel engine 4Ч11,0/12,5 (D-242)

Питома ефективна витрата палива (г/квт·год) визначається за залежністю:

$$g_e = 245,467 - 0,013 \cdot (n - 1500) - 1,732 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1500)^2 \quad (4)$$

Циклова подача палива (мг/цикл) визначається за залежністю:

$$q_{ц} = 52,31 - 0,019 \cdot (n - 1500) - 1,123 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1500)^2 \quad (5)$$

Концентрація оксидів вуглецю у відпрацьованих газах (%) визначається за залежністю:

$$CO = 0,323 - 1,071 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1500) + 1,629 \cdot 10^{-4} \cdot (n - 1500)^2 \quad (6)$$

Концентрація вуглеводневих сполук у відпрацьованих газах (млн⁻¹) визначається за залежністю:

$$C_m H_n = 25,905 - 0,018 \cdot (n_i - 1500) + 7,24 \cdot 10^{-3} \cdot (n_i - 1500)^2 \quad (7)$$

Концентрація оксидів азоту у відпрацьованих газах (млн⁻¹) визначається за залежністю:

$$NO_x = 1242,714 + 0,354 \cdot (n - 1500) - 0,023 \cdot (n - 1500)^2 \quad (8)$$

Димність відпрацьованих газів (%) визначається за залежністю:

$$N = 88,819 - 0,042 \cdot (n - 1500) - 0,011 \cdot (n - 1500)^2 \quad (9)$$

Крутний момент дизеля (Н·м) визначається за залежністю:

$$M_k = 241,924 - 0,079 \cdot (n - 1500) - 4,183 \cdot 10^{-3} \cdot (n - 1500)^2 \quad (10)$$

Перевірка адекватності отриманих поліноміальних залежностей, які описують економічні та екологічні показники дизеля Д-243 проводилась з використанням F – критерія Фішера [7, 8]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{(y)}^2} \quad (11)$$

де $S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;
 $S_{(y)}^2$ – дисперсія відтворюваності.

Якщо отримані розрахунком значення F_p – критерія не перевищують табличних даних F_{τ} , то з відповідною довірчою вірогідністю поліноміальну залежність можна вважати адекватною. При перевірці адекватності були використані таблиці F – критерія Фішера при 5% – му рівні значимості [8], тому довірча вірогідність складає 95%.

Дисперсія адекватності представляє остаточну суму квадратів ($\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_o - Y_p)$) різниць між експериментально заміряними значеннями Y_o та розрахованими по поліноміальним залежностям Y_p , поділену на число ступенів вільності f :

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2}{f} \quad (12)$$

Число ступенів вільності f в плануванні експерименту дорівнює різниці між числом дослідів N і числом коефіцієнтів k , що визначаються:

$$f = N - k \quad (13)$$

Дисперсія відтворюваності $S_{(y)}^2$ може бути визначена шляхом постановки додаткових дослідів в одній з точок по залежності:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (14)$$

де n – число додаткових дослідів;

Y_i – значення параметра, яке отримується в i – му досліді;

\bar{Y} – середнє значення заміряних параметрів.

Результати перевірки адекватності поліноміальних залежностей, які описують економічні та екологічні показники дизеля Д-243 наводяться в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати перевірки адекватності поліноміальних залежностей, які описують економічні та екологічні показники дизеля Д-242

Table 1 – The results of testing the adequacy of polynomial dependencies characterizing the economic and environmental performance of the diesel engine D-242

№	Найменування параметру	Дисперсія адекватності	Дисперсія відтворюваності	Розрахункове значення критерія Фішера	Табличне значення критерія Фішера
		$S_{ад}^2$	S_y^2	F_p	F_T
1	Годинна витрата повітря $G_{пов}$	7,504	8,714	0,861	19,2
2	Годинна витрата палива $G_{пал}$	$4,881 \cdot 10^{-3}$	0,002	2,306	19,2
3	Питома витрата палива g_e	1,345	1,501	0,896	19,2
4	Циклова подача палива $q_{ц}$	1,088	0,065	16,65	19,2
5	Концентрація у ВГ оксидів вуглецю CO	$4,345 \cdot 10^{-4}$	0,0003	1,418	19,2
6	Концентрація у ВГ вуглеводневих сполук C_mH_n	13,274	2,25	5,899	19,2
7	Концентрація у ВГ оксидів азоту NO_x	286,607	60025	$4,774 \cdot 10^{-3}$	19,2
8	Димність відпрацьованих газів N	0,836	3,197	0,26	19,2
9	Ефективний крутний момент M_k	4,717	1,501	3,143	19,2

Висновки

Для оцінки паливної економічності, екологічних і енергетичних показників дизеля 4Ч11,0/12,5 (сімейства Д-240, Д-241, Д-242, Д-243) силового обладнання дорожніх машин були проведені експериментальні випробування, по визначенню зовнішніх швидкісних характеристик.

Отримані в результаті експерименту максимальна потужність N_e , максимальний крутний момент M_k і питома ефективна витрата палива g_e відповідають значенням для дизеля 4Ч11,0/12,5 (Д-242), наведеним в [2].

Значення коефіцієнту запасу крутного моменту для дизеля за стандартних налаштувань коректора паливоподачі при яких проводились випробування складає 25,5%, при цьому значення запасу крутного моменту для дизеля Д-242 згідно з [2] становить $15 \pm 1\%$, завдяки чому в подальших дослідженнях можна буде зменшити витрату палива і токсичність відпрацьованих газів.

Як показують проведені дослідження по визначенню екологічних показників та паливної економічності дизеля, які отримані від одного фактору (від частоти обертання колінчастого валу дизеля) адекватно описуються поліноміальними залежностями другого ступеня.

Перелік посилань

1. Архангельский В.М., Вихерт М.М., Воинов А.Н., Степанов Ю.А., Трусов В.И., Ховах М.С. Автомобильные двигатели: учеб. Москва, 1977. 591 с.
2. Липницкий Э.И. Дизели Д-240, 245 и их модификации: техническое описание и инструкция по эксплуатации. Минск, 1986. 88 с.
3. Гутаревич Ю.Ф., Корпач А.О. Випробування двигунів внутрішнього згорання: навч. посіб. Київ, 2002. 191 с.
4. Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.В., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мержієвська Л.П. Екологія автомобільного транспорту: навч. посіб. Київ, 2002. 312 с.
5. Мороз В.В. Математична модель дизеля для використання в системі водій–автомобіль–дорога. Системні методи керування, технологія, та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів. Київ, 2003. Вип. 16. С.147-151.
6. Рафалес–Ламарка Э. Э., Николаев В.Г. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов: учеб. пособ. Киев, 1971. 119 с.
7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: учеб. пособ. Москва, 1976. 279 с.
8. Зедгинадзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем: учеб. Москва, 1976. 390 с.

DETERMINATION OF THE EXTERNAL SPEED CHARACTERISTICS OF THE POWER EQUIPMENT OF ROAD MACHINES

Moroz Valentyn V., National Transport University, Department of Machine Engineering for Transport Construction, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, frostvaliko@gmail.com, +380442809773, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 226, <https://orcid.org/0000-0003-3000-4961>

Kovbasenko Sergii V., National Transport University, Department of Machine Engineering for Transport Construction, Candidate of Science (Engineering), Professor, svkovsv@gmail.com, +380442809773, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 226, <https://orcid.org/0000-0002-7309-8200>

Levkivskiy Sergii A., National Transport University, Department of Machine Engineering for Transport Construction, Senior Lecturer, s.a.levkovsky@gmail.com, +380442809773, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 226, <https://orcid.org/0000-0003-1515-4240>.

Abstract. The paper deals with the issue of determining the fuel efficiency and toxicity of exhaust gases of power equipment of road machines operating in traction modes, namely, plow and plow-brush snowplows based on a pneumatic wheeled tractor.

The object of research is fuel efficiency and toxicity of exhaust gases of power equipment.

The purpose of the study is to experimentally determine the external speed characteristics of a 4Ч11,0 / 12,5 diesel engine (D-240, D-241, D-242, D-243 families), namely: maximum power N_e , maximum torque M_k ; hourly consumption of fuel $G_{\text{пал}}$ and air $G_{\text{пов}}$, specific effective fuel consumption g_e ; concentrations of harmful substances in the exhaust gases: carbon monoxide CO , hydrocarbon compounds C_mH_n , nitrogen oxides NO_x and opacity N of the exhaust gases.

The paper presents the results of experimental studies to determine the energy performance (maximum power N_e and maximum torque M_k) of a diesel engine (4Ч11,0/12,5 (D-242)) of power equipment; fuel efficiency indicators (hourly fuel consumption $G_{\text{пал}}$ and specific effective fuel consumption g_e); hourly air consumption $G_{\text{пов}}$; concentrations of harmful substances in the exhaust gases: carbon monoxide CO , hydrocarbon compounds C_mH_n , nitrogen oxides NO_x and opacity N of the exhaust gases. Which are obtained with the position of the fuel supply control, which corresponds to the maximum fuel supply from the diesel crankshaft speed. The above indicators were determined at standard diesel fuel supply settings.

Based on the obtained external speed characteristics N_e , M_k , $G_{\text{пал}}$, g_e , $G_{\text{пов}}$, CO , C_mH_n , NO_x and N , mathematical (polynomial) dependencies were determined, which are described from the speed of the diesel crankshaft, and their adequacy was checked.

The studies carried out made it possible to determine the main direction of increasing fuel efficiency and reducing emissions of harmful substances of a diesel engine.

Key words: External speed characteristics, energy and environmental performance, fuel efficiency, harmful substances, exhaust gases, polynomial models, adequacy.

References

1. Arkhangel'skii V.M., Vikhert M.M., Voinov A.N., Stepanov Yu.A., & Trusov V.I. Avtomobilnyie dvigateli (Automotive engines): Tutorial. Moscow, 1977. 591 s. [in Russian].
2. Lipnitskii E.I. Dizeli D-240, 245 i ikh modifikatsii (Diesels D-240, 245 and their modifications): Technical description. Minsk, 1986. 88 s. [in Belarusian].
3. Gutarevych Yu.F., & Korpach A.O. Vyprovuvannia dvyguniv vnutrishnogo zgoriannia (Testing of internal combustion engines): Tutorial. Kyiv, 2002. 191 s. [in Ukrainian].
4. Gutarevych Yu.F., Zerkalov D.V., Govorun A.G., Korpach A.O., & Merzhyievska L.P. Ekologiiia avtomobilnogo transportu (Ecology of road transport): Tutorial. Kyiv, 2002. 312 s. [in Ukrainian].
5. Moroz V.V. Matematychna model dyzelia dlia vykorystannia v systemi vodii–avtomobil–doroga (Mathematical model of a diesel engine for use in the driver-car-road system). Systemni metody keruvannia, tekhnologiiia, ta organizatsia vyrobnytsva, remontu ta ekspluatatsii avtomobiliv. Kyiv, 2003. №16. S. 147-151. [in Ukrainian].
6. Rafales–Lamarka E.E., Nikolaiev, V.G. Nekotoryie metody planirovaniia i matematicheskogo analiza biologicheskikh eksperimentov (Some methods of planning and mathematical analysis of biological experiments): Tutorial. Kyiv, 1971. 119 s. [in Ukrainian].
7. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiskie optimalnykh uslovii (Planning an experiment to find optimal conditions): Tutorial. Moscow, 1976. 279 s. [in Russian].
8. Zedginadze I.G. Planirovanie eksperimenta dlia issliedovaniia mnogokomponentnykh sistem (Planning an experiment to study multicomponent systems): Tutorial. Moscow, 1976. 390 s. [in Russian].