

О.В. Захарчук, к.т.н., ст. викл.

Луцький національний технічний університет

### ПОРІВНЯЛЬНІ СТЕНДОВІ ВИПРОБУВАННЯ ГАЗОВОГО ДВИГУНА ТА БАЗОВОГО ДИЗЕЛЯ Д-240 ЗА СТАНДАРТИЗОВАНИМ ЦИКЛОМ

Проведено стендові випробування газового двигуна та базового дизеля Д-240. Отримано навантажувальні характеристики цих двигунів з показниками токсичності відпрацьованих газів. При порівнянні результатів випробувань застосовано стандартизований підхід відповідно до Правил ЄЕК ООН № 49.

**Ключові слова:** газовий двигун, природний газ, випробувальний цикл, витрата палива, шкідливі викиди.

**Вступ. Постановка проблеми.** Інтенсивне зростання ціни на дизельне паливо за останні роки і пов'язане з цим збільшення частки витрат на традиційне паливо зумовили актуальність розробок по використанню альтернативних видів палива. Крім того, сьогодні стоїть проблема зниження викидів шкідливих речовин (ШР) з відпрацьованими газами (ВГ) транспортних дизелів. Одним з ефективних шляхів зниження токсичності ВГ дизелів є застосування стиснутого природного газу (СПГ).

**Аналіз публікацій.** Найбільш об'єктивні дані щодо роботи автотранспортного засобу можна отримати шляхом замірів його показників під час руху за їздовими циклами. Їздові цикли містять усталені та перехідні режими у широкому діапазоні роботи двигуна, що дає можливість досить точно та повно визначити велику кількість його вихідних параметрів, а зокрема екологічні показники ДВЗ. На сьогодні відомо багато різновидів їздових циклів. У Європейських країнах на сьогоднішній день діють норми Правил ЄЕК ООН рівня EURO V, а з 2015 EURO VI. У США випробування проводять за міським їздовим циклом FTP-75, в Японії випробовують автомобілі за 10–15 режимним циклом та 11-режимним циклом [1].

У нашій країні також вводяться європейські норми на токсичність ВГ двигунів. Ці норми обмежують вміст оксидів азоту  $NO_x$ , оксиду вуглецю CO, вуглеводнів  $C_mH_n$ , твердих частинок (ТЧ) у ВГ. Сьогодні на території України діють норми рівня EURO III.

Режими роботи двигунів транспортних засобів є різноманітні і залежать від характеру експлуатації транспортного засобу. Досвід експлуатації автомобілів показав, що час роботи двигуна на окремих режимах складають: на режимі холостого ходу – 35 %, з прискоренням – 22 %, на режимах з постійними частотами обертання – 29 %, зі сповільненням – 14 % [2].

Для проведення теоретичних досліджень газового двигуна на екологічні показники та паливну економічність необхідно вибрати випробувальний цикл, режими якого найбільш достовірно відтворюють роботу двигуна в умовах експлуатації та який можливо відтворити при стендових випробуваннях.

Оскільки найбільш доцільно використовувати газові двигуни на автобусах і вантажних автомобілях, то для порівняння екологічних показників газового двигуна і дизеля було вибрано 13 – режимний випробувальний цикл ЄЕК ООН № 49. Цей цикл повністю відтворює експлуатаційні умови транспортного засобу: три режими холостого ходу з мінімальною частотою обертання колінчастого вала двигуна  $n = 0,25 - 0,3 n_{ном}$  (всього 25 % часу роботи), п'ять режимів (10, 25, 50, 75, 100 % навантаження) навантажень при номінальній частоті обертання  $n_{ном}$  і п'ять режимів (10, 25, 50, 75, 100 % навантаження) навантажень при частоті обертання  $n_{max} = 0,6 - 0,7 n_{ном}$ , відповідної максимальному крутному моменту двигуна (рис. 1). Частка номінального режиму складає 10 % від загального часу роботи двигуна. В кінці кожного з режимів тривалістю 10 хв. визначаються середні значення концентрацій  $NO_x$ , CO,  $C_mH_n$ , ТЧ у ВГ і ефективна потужність  $N_e$  [3].

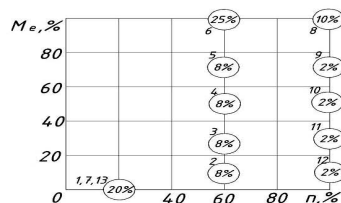


Рис. 1. Стаціонарний Європейський цикл, що використовується для оцінки токсичності ВГ двигунів в стендових умовах (ЄЕК ООН № 49)

© О.В. Захарчук, 2014 токсичності ВГ двигуна на режимах такого 13-ступінчастого циклу на кожному режимі визначаються концентрації у ВГ токсичних компонентів і розраховуються їх годинні масові викиди. Отримані значення шкідливих викидів підсумовують за весь цикл по кожному компоненту і потім враховуючи середню потужність двигуна за випробувальний цикл визначають питомі викиди шкідливих речовин.

**Постановка завдання.** Вибір та обґрунтування типу випробувального циклу та проведення стендових випробувань і теоретичних досліджень показників токсичності ВГ газового двигуна переобладнаного з дизеля та порівняння показників з базовим дизелем Д-240.

**Викладення основного матеріалу.** В лабораторії автомобільних двигунів Луцького національного технічного університету було переобладнано дизель Д-240 в газовий двигун. Проведено експериментальні дослідження показників газового двигуна, переобладнаного з дизеля Д-240. Було здійснено найпростіше переобладнання, яке можна виконувати в умовах невеликих підприємств. Конвертація дизеля здійснена з мінімальними витратами коштів за рахунок використання серійного газового обладнання, серійної системи запалювання бензинового двигуна і невеликих змін в конструкції двигуна. Зокрема ступінь стиснення був зменшений з 16 до 12 встановленням додаткових прокладок головки циліндрів. Стендові випробування газового двигуна проводились на електричному гальмівному стенді

КИ-4893 ГОСНИТИ. Під час досліджень визначалися: ефективний крутний момент  $M_k$ , частота обертання колінчастого вала  $n_d$ , годинна витрата газу  $G_{газ}$ , годинна витрата повітря  $G_{пов}$ , розрідження у впускному колекторі  $\Delta p_k$ , кут випередження запалювання  $\Theta$ , положення дросельних заслінок  $\varphi_{др}$  газоповітряного змішувача, температура води в системі охолодження  $t_w$ , температура оливи  $t_{ол}$ , вміст у відпрацьованих газах оксиду вуглецю  $CO$ , вуглеводнів  $C_mH_n$  і оксидів азоту  $NO_x$ . Вимірювання об'ємних часток оксиду вуглецю  $CO$  та вуглеводнів  $C_mH_n$  здійснювалося газоаналізатором SUN MGA 1500. Об'ємні частки оксидів азоту вимірювалися газоаналізатором 344ХЛ-011.

Для порівняння показників газового двигуна з показниками дизеля отримані їх швидкісні та навантажувальні характеристики в усьому діапазоні режимів роботи. На рисунку 2 наведені навантажувальні характеристики газового двигуна та дизеля для частоти обертання  $n_d = 1400 \text{ хв}^{-1}$ .

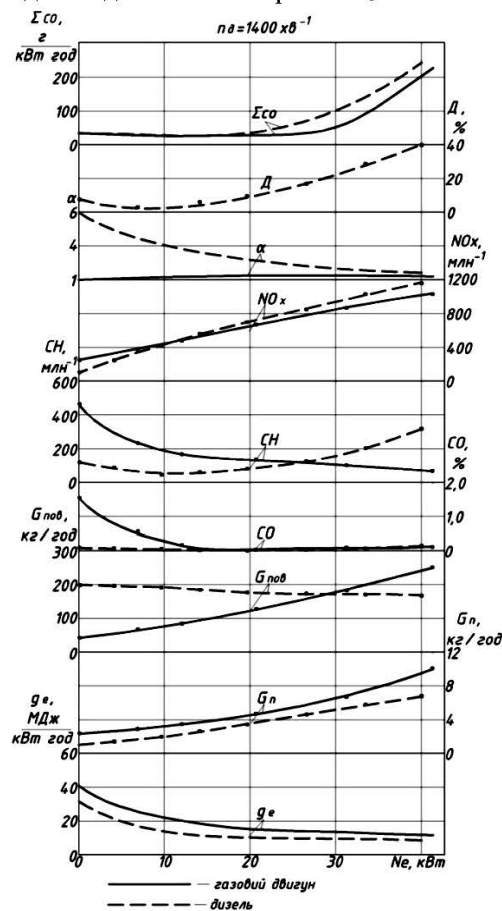


Рис. 2. Навантажувальна характеристика газового двигуна та дизеля при  $n_d = 1400 \text{ хв}^{-1}$

Аналіз характеристики показує, що під час роботи на СПГ потужність двигуна підвищилась з 40 кВт до 41,4 кВт (на 3,4 %). Деяке підвищення потужності пояснюється роботою газового двигуна при значно менших значеннях коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha = 0,99 \dots 1,1$ . Еквівалентна питома ефективна витрата палива (в МДж/(кВт·год.)) газового двигуна в порівнянні з дизелем збільшилась на 16,8...25,6 %.

Концентрації викидів  $CO$  у газового двигуна більші, ніж у дизеля на холостому ході та малих навантаженнях, і дещо менші при максимальному навантаженні. Така ж закономірність характерна і для викидів вуглеводнів  $C_mH_n$ , з яких переважну частину становить метан  $CH_4$ . Викиди  $NO_x$  у дизеля менші на середніх навантаженнях, але більші на максимальних. Також у ВГ газового двигуна відсутня сажа, викиди якої мають місце в дизеля.

Сумарна токсичність відпрацьованих газів, зведена до оксиду вуглецю CO газового двигуна та дизеля суттєво залежить від навантаження на двигун. Якщо при малих навантаженнях різниця в сумарній токсичності практично відсутня, то при збільшенні навантаження, до максимальних значень сумарна токсичність газового двигуна зменшується до 55 % порівняно з дизелем.

На основі методики, описаної в ДСТУ UN/ECE R 49 [4] і отриманих експериментальних результатів, було проведено розрахунок показників паливної економічності та токсичності газового двигуна та дизеля Д-240 для їх порівняльної оцінки. Згідно з представленою в стандарті методикою проведено заміри ефективних і екологічних показників на 13-ти режимах циклу випробувань. Розрахунки виконувались за допомогою математичного середовища MathCad.

При оцінці токсичності ВГ двигуна на режимах такого 13-ти ступінчастого циклу на кожному режимі визначаються концентрації у ВГ токсичних компонентів ( $C_{NOx}$ ,  $C_{CO}$ ,  $C_{CH}$ ,  $C_{TЧ}$ ) і розраховуються їх годинні масові викиди ( $E_{NOx}$ ,  $E_{CO}$ ,  $E_{CH}$ ,  $E_{TЧ}$ ). Набуті значення шкідливих викидів підсумовують за весь цикл по кожному компоненту (з врахуванням коефіцієнтів  $k$ , що відображають частку часу кожного режиму) і потім враховуючи середню потужність дизеля за випробувальний цикл  $\sum(N_{ei} \cdot k)$  визначають питомі викиди шкідливих речовин за формулами [3]:

$$e_{NOx} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{NOx} \cdot k)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot k)}$$

$$e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{CO} \cdot k)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot k)}$$

$$e_{CH} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{CH} \cdot k)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot k)}$$

$$e_{TЧ} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{TЧ} \cdot k)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} \cdot k)}$$

Значення питомих викидів токсичних компонентів, віднесені до одиниці отриманої потужності ( $e_{NOx}$ ,  $e_{CO}$ ,  $e_{CH}$ ,  $e_{TЧ}$ ) газового двигуна порівнюються з дизелем.

Показники роботи газового двигуна та дизеля Д-240 за правилами R 49 ЄЕК ООН наведені в таблиці 1. Результати розрахунків питомих шкідливих викидів та витрати палива наведені в таблиці 2 та на рисунку 3.

Таблиця 1  
Показники оцінки роботи газового двигуна та дизеля Д-240 за правилами R 49 ЄЕК ООН

№ з/П	$n_d$ , хв. <sup>-1</sup>	$N_{es}$ , кВт		$C_{CO}$ , %		$C_{CH}$ , млн <sup>-1</sup>		$C_{NOx}$ , млн <sup>-1</sup>		$C_D$ , %	$G_{нал}$ , кг/год.		$k$
		ПГ	ДП	ПГ	ДП	ПГ	ДП	ПГ	ДП		ДП	ПГ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	750	0	0	1,5	0,1	850	103	10	105	8	1,7	1,6	0,083
2	1400	4,2	4,02	1,1	0,039	455	70,5	300	313,6	2,09	3,27	2,4	0,08
3	1400	10,45	10,15	0,4	0,022	200	50,7	525	532	2,8	3,6	3,7	0,08
4	1400	20,9	20,1	0,05	0,036	154	84	770	848	9,9	4,7	5,9	0,08
5	1400	31,35	30,15	0,045	0,103	110	199	950	1105	24,6	7,62	8,3	0,08

Закінчення табл. 1

6	1400	41,48	40,2	0,3	0,223	95	397	920	1302	46,9	10,42	10,7	0,25
7	750	0	0	1,5	0,1	850	103	10	105	8	1,7	1,6	0,083
8	2200	57	55,1	0,038	0,15	90	295	1150	1280	21	14,03	12,3	0,10
9	2200	42,75	41,33	0,043	0,07	130	159	850	1064	8,8	10,77	9,8	0,02
10	2200	28,5	27,05	0,05	0,028	150	83	760	805	1,49	7,96	7,3	0,02
11	2200	14,25	13,8	0,45	0,025	170	67,6	570	502	0,6	5,66	4,8	0,02
12	2200	5,7	5,51	1,2	0,042	190	87,2	300	298,3	1,19	4,53	3,4	0,02
13	750	0	0	1,5	0,1	850	103	10	105	8	1,7	1,6	0,083

Був проведений аналіз токсичних показників газового двигуна та дизеля. Так питомі викиди оксиду вуглецю CO газового двигуна на 16,31 % більші, ніж у дизеля. Це можна пояснити тим, що газовий двигун працює на паливоповітряній суміші з нижчими значеннями коефіцієнта надлишку повітря, ніж дизель. Питомі викиди вуглеводнів  $C_mH_n$  газового двигуна менші в 2,61 раза, ніж у дизеля, а оксидів азоту  $NO_x$  – в 1,63 раза

менші. Слід зазначити, що вуглеводневий викид газового двигуна набагато безпечніший ніж бензинового, так як основу вуглеводневої частини його відпрацьованих газів складає метан  $\text{CH}_4$ , який з усіх граничних вуглеводнів має найбільшу стійкість до процесу окислення окислами азоту. Отримані значення питомих витрат палива за цикл випробувань були зведені до єдиних енергетичних одиниць – МДж/(кВт·год.).

Аналізуючи отримані значення показників енергетичних затрат, можна сказати що під час роботи двигуна на СПГ середні сумарні значення еквівалентної питомої ефективної витрати палива, складають – 18,2 МДж/(кВт·год.) а при роботі двигуна на ДП – 14,8 МДж/(кВт·год.). Отже, газовий двигун споживає на 18,7% більше палива, приведеного до єдиних енергетичних одиниць, ніж дизель.

Таблиця 2

Результати розрахунку витрат палива та питомих викидів шкідливих речовин газового двигуна та дизеля за правилами R 49 ЄЕК ООН (г/кВт·год.)

№ з/п	$k_{N_b}$ , кВт		$k_{E_{CO}}$		$k_{E_{CH}}$		$k_{E_{NOx}}$		$k_{E_D}$	$g_b$ МДж/кВт год.	
	ПГ	ДП	ПГ	ДП	ДП	ПГ	ДП	ПГ	ДП	ПГ	ДП
1	0	0	33,24	10,96	0,064	1,08	0,65	0,036	1,89	–	–
2	0,336	0,322	45,75	6,85	0,007	1,08	0,71	2,049	9,04	37,9	25,3
3	0,836	0,812	24,15	3,84	0,012	0,69	0,51	5,2	15,25	16,7	15,4
4	1,672	1,608	4,64	6,21	0,155	0,82	0,83	11,74	24,03	10,9	12,4
5	2,508	2,412	5,48	17,57	0,947	0,76	1,95	19,02	30,96	11,8	11,7
6	10,45	10,05	132,5	117,4	10,63	2,4	11,99	83,42	112,6	12,1	11,3
7	0	0	33,24	10,96	0,064	1,08	0,65	0,036	1,89	–	–
8	5,7	5,51	8,83	39,44	1,064	1,19	4,45	45,8	55,22	11,9	9,4
9	3,42	3,306	1,59	14,87	0,151	0,27	1,94	14,12	37,05	9,1	10,1
10	2,28	2,164	1,49	6,01	0,004	0,25	1,02	8,984	28,26	13,6	11,4
11	1,14	1,104	9,24	5,41	0,001	0,2	0,83	5,01	17,71	19,3	14,7
12	0,456	0,441	17,42	9,15	0,003	0,15	1,09	1,71	10,56	38,7	26,2
13	0	0	33,24	10,96	0,064	1,08	0,65	0,036	1,89	–	–

Для порівняння токсичності ВГ газового двигуна та дизеля визначалися сумарні питомі викиди, приведені до  $\text{CO}$  за залежністю 2:

$$G_{CO} = A \cdot m_{CO} + B \cdot m_{C_nH_n} + C \cdot m_{NO_x} + D \cdot m_{TЧ}, \quad (2)$$

де  $m_{CO}$ ,  $m_{C_nH_n}$ ,  $m_{NO_x}$ ,  $m_{TЧ}$  – питомі викиди відповідно оксиду вуглецю, вуглеводнів, оксидів азоту і твердих частинок, г/кВт·год.;

$A, B, C, D$  – коефіцієнти агресивності відповідних компонентів.

Для оцінки сумарної токсичності ВГ двигунів в сучасних дослідженнях приймаються такі значення коефіцієнтів агресивності:  $A_{CO}=1$ ,  $B_{CH}=3,16$ ,  $C_{NO_x}=41,1$ ,  $D_{TЧ}=200$ . Значення сумарної токсичності ВГ газового двигуна складає 294,52 г/кВт·год., а для дизеля цей показник рівний 578,3 г/кВт·год.

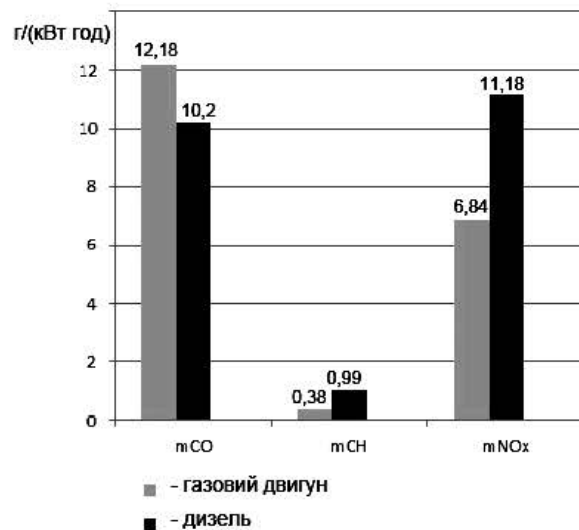


Рис. 3. Порівняльна діаграма питомих викидів токсичних компонентів ВГ газового двигуна та дизеля

Таким чином екологічні показники газового двигуна в 1,96 раза є кращі, ніж у дизеля.

**Висновок.** На основі методики правил R 49 ЄЕК ООН проводились порівняння паливної економічності та токсичності газового двигуна та базового дизеля. Викиди окремих шкідливих речовин на деяких режимах роботи газового двигуна є більшими, ніж у дизеля, але сумарна токсичність відпрацьованих газів, газового двигуна складає 294,52 г/кВт-год., а в дизеля становить 578,3 г/кВт-год. Таким чином екологічні показники газового двигуна в 1,96 раза є кращі, ніж у дизеля. При роботі двигуна на СПГ середні сумарні значення еквівалентної питомої ефективної витрати палива складають – 18,2 МДж/кВт-год., а при роботі двигуна на ДП – 14,8 МДж/кВт-год. Отже, газовий двигун споживає до 18,7 % більше палива, приведеного до єдиних енергетичних одиниць, ніж дизель.

#### Список використаної літератури:

1. Екологія автомобільного транспорту / Ю.Ф. Гутаревич, Д.В. Зеркалов, А.Г. Говорун, А.О. Корпач, Л.П. Мерзиевська. – К. : Арістей, 2006. – 292 с.
2. Горбунов В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.В. Горбунов, Н.Н. Патрахальцев. – М. : ФГУП «НАМИ», 2006. – 123 с.
3. Грицук І.В. До питання вибору і обґрунтування типу випробувального ізового циклу для дослідження показників токсичності відпрацьованих газів двигунів дорожніх транспортних засобів / І.В. Грицук, А.В. Кривошусков, Д.О. Гриценко : зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2009. – № 17. – С. 106–119.
4. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження двигунів із запалюванням від стиснення і двигунів, які працюють на природному газі, а також двигунів із примусовим запалюванням, які працюють на зрідженому нафтовому газі (ЗНГ), і колісних транспортних засобів, оснащених двигунами із запалюванням від стиснення, двигунами, які працюють на природному газі, і двигунами з примусовим запалюванням, які працюють на ЗНГ, стосовно викидання ними забруднювальних речовин: ДСТУ UN/ECE R 49 А, В-02:2005. – Введ. 01.10.09. – Держспоживстандарт, 2005. – 600 с.

ЗАХАРЧУК Олег Вікторович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– показники двигунів та транспортних засобів при їх роботі на альтернативних паливах.

Тел.: (099)114–30–51.

E-mail: Zaharchukov205@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2014