

УДК 621.43.057

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.2\(495\).6](https://doi.org/10.15589/znp2024.2(495).6)

USE OF HYDROGEN-CONTAINING GAS ADDITIVE TO IMPROVE PERFORMANCE INDICATORS OF SPARK IGNITION ENGINES OPERATING ON LIQUEFIED PETROLEUM GAS

ВИКОРИСТАННЯ ДОБАВКИ ВОДНЕВМІСНОГО ГАЗУ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ ЗА РОБОТИ НА ЗРІДЖЕНОМУ НАФТОВОМУ ГАЗІ

Yevhenii V. Shuba

shuba90@i.ua

ORCID: 0000-0003-2036-8024

Mykola I. Panin

mikolapanin@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4857-4583

Є. В. Шуба,

канд. техн. наук, доцент

М. І. Панін,

аспірант

*National Transport University, Kyiv**Національний транспортний університет, м. Київ*

Abstract. Purpose. Investigate the impact of hydrogen-containing gas addition to the air charge on the spark ignition engine performance running on liquefied petroleum gas in various speed and load modes

Method. Experimental, Calculation and theoretical methods.

Results. It has been established that when the engine operates on liquefied petroleum gas with the addition of hydrogen-containing gas, the greatest fuel economy is observed at low load conditions and at low crankshaft rotation frequencies. Specifically, during engine operation at various loads with a frequency of 1400 rpm, the fuel consumption on average decreases by 8.6% compared to the fuel consumption during engine operation without the H₂/O₂ additive, and at a frequency of 5000 rpm, it decreases by an average of 4%. During engine operation without load at different speed regimes (from 1400 to 5000 rpm), fuel consumption decreases on average by 9.9%. As the load increases, fuel savings decrease to 4.2% during operation at 100 N·m load. Carbon monoxide (CO) concentrations decrease on average by 7.7–19.8%. Concentrations of unburned hydrocarbons (C_mH_n) decrease on average by 6.8–11.2%. When the engine operates with the addition of hydrogen-containing gas, nitrogen oxides (NO_x) concentrations increase on average by 7.7% across the entire range of speed and load modes.

Scientific novelty. It was established that the addition of hydrogen-containing gas leads to an improvement in fuel efficiency and a decrease in the concentration of incomplete combustion products in the exhaust gases of a spark ignition engine when operating on liquefied petroleum gas in different speed and load conditions.

Practical importance. The practical value of the results is the polynomial dependences, which allow determining the effect of the hydrogen-containing gas addition on the fuel-economical and environmental indicators of the engine in a wide ranges of speed and load modes.

Key words: liquefied petroleum gas; hydrogen containing gas; spark-ignition engine; fuel economy; environmental indicators.

Анотація. Мета. Дослідити вплив добавки водневмісного газу на показники двигуна з іскровим запалюванням, за роботи на зрідженому нафтовому газі в різних швидкісних та навантажувальних режимах.

Методика. Експериментальні та розрахунково-теоретичні методи.

Результати. Встановлено, що за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі з добавкою водневмісного газу найбільша економія палива спостерігається за роботи двигуна в режимах малих навантажень і за невеликої частоти обертання колінчастого вала. Зокрема за роботи двигуна при різних навантаженнях з частотою 1400 хв⁻¹ годинна витрата палива в середньому зменшується на 8.6 % порівняно з витратою палива за роботи двигуна без добавки H₂/O₂, за роботи з частотою 5000 хв⁻¹ – в середньому на 4 %. За роботи двигуна без навантаження в різних швидкісних режимах (від 1400 до 5000 хв⁻¹) витрата палива знижується в середньому на 9.9 %. При збільшенні навантаження економія палива знижується до 4.2 % за роботи з навантаженням 100 Н·м. Концентрації СО знижуються в середньому на 7.7–19.8 %. Концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n знижу-

ються в середньому на 6.8–11.2 %. За роботи двигуна з додавкою водневмісного газу концентрації оксидів азоту NO_x зростають в середньому на 7.7 % у всьому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів.

Наукова новизна. Встановлено, що додавка водневмісного газу приводить до поліпшення паливної економічності та зниження концентрацій продуктів неповного згорання у відпрацьованих газах двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі в різних швидкісних та навантажувальних режимах.

Практична значимість. Практичну значимість одержаних результатів становлять поліноміальні залежності, що дозволяють визначити вплив додавки водневмісного газу на паливо-економічні та екологічні показники двигуна в широких межах швидкісних і навантажувальних режимів.

Ключові слова: зріджений нафтовий газ; водневмісний газ; двигун з іскровим запалюванням; паливна економічність; екологічні показники.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Автомобільний транспорт є однією з галузей, що в значній мірі визначає розвиток промисловості будь-якої країни. Світовий парк транспортних засобів продовжує безупинно зростати. Не винятком стала і Україна, де автомобільний транспорт задовольняє потреби в перевезенні вантажів та пасажирів у великому обсязі. Значна необхідність в транспортних засобах підвищує попит на традиційні палива нафтового походження. Враховуючи, що світові запаси нафти постійно скорочуються, виникає потреба у знаходженні альтернативних джерел енергії, які можливо використати замість традиційних. З підвищенням кількості транспортних засобів, які працюють на паливах нафтового походження, підвищується також екологічна небезпека. Отримані від роботи двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) відпрацьовані гази являють собою надзвичайно складну, недостатньо вивчену суміш компонентів, які достатньо токсичні і при потрапленні в приземний шар повітря розсіюються зі значним ускладненням. Тому важливо відмітити, що нетрадиційні моторні палива, які здатні замінити традиційні, мають бути відносно екологічними.

Найпоширенішим альтернативним паливом для ДВЗ є зріджений нафтовий газ (ЗНГ), який отримують при видобутку й переробці нафти як побічний продукт. ЗНГ складається із суміші газів пропану і бутану. Використання ЗНГ для живлення двигунів в Україні зростає дуже високими темпами, що пов'язано з багатьма перевагами даного палива перед бензином: зменшення витрат на паливо (приблизно в 1.5 рази); можливість встановлення газобалонного обладнання без механічних змін двигуна; зменшення концентрацій певних шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Основним недоліком ЗНГ на транспорті є деяке підвищення об'ємної витрати палива (на 10–15 %). Одним із шляхів поліпшити паливну економічність та екологічні показники ДВЗ при роботі на зрідженому нафтовому газі є використання активуючих добавок, що інтенсифікують процес згорання. Даний шлях є дуже перспективним, оскільки він не потребує зміни конструкції двигуна і його можна легко реалізувати в умовах експлуатації.

В даній роботі наведені результати дослідження впливу додавки водневмісного газу до повітряного

заряду на показники двигуна з іскровим запалюванням при роботі на зрідженому нафтовому газі в різних швидкісних та навантажувальних режимах.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Опубліковано багато наукових досліджень, в яких водень або водневмісні сполуки використовують для поліпшення характеристик ДВЗ. Зокрема в роботі [1] проведено дослідження впливу додавки H_2/O_2 на роботу одноциліндрового двигуна 150cc, який живиться бензином та зрідженим нафтовим газом. В обох випадках додавка H_2/O_2 призвела до зменшення витрати палива та зниження викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Встановлено, що при використанні додавки водневмісного газу витрата палива знижується, в порівнянні з роботою на бензині та ЗНГ, на 9.6 % та 15.7 % відповідно.

В роботі [2] досліджували вплив додавки H_2/O_2 на роботу одноциліндрового двигуна з іскровим запалюванням за роботи на ЗНГ. Водневмісний газ подавали в циліндр двигуна разом зі свіжим повітряним зарядом. Встановлено, що додавка газу H_2/O_2 підвищує термічний ККД двигуна на 13 % і зменшує витрату палива на 11 %. Додавка H_2/O_2 призводить до зниження вмісту CO на 9 % і C_mH_n на 21 %. Викиди NO_x збільшилися на 6.5 %.

В роботі [3] наведено результати досліджень впливу додавки водневмісного газу на показники двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі. Зокрема проведено дослідження в режимі, що відповідає середній точці Європейського їздового циклу і встановлено оптимальну додавку водневмісного газу H_2/O_2 . Визначено навантажувальні характеристики двигуна за роботи з частотою 2200 хв^{-1} без додавки та з оптимальною додавкою водневмісного газу. Встановлено, що з врахуванням витрат електричної енергії на отримання водневмісного газу доцільно обмежити величину додавки на рівні 4...6 %. За роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі з оптимальною додавкою водневмісного газу в режимах малих навантажень зниження питомої ефективної витрати палива становить 8 %. В інших режимах економія палива становить в середньому 3.5 %. Знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів, що свідчить про більш повне згорання суміші. Зниження

концентрацій $C_m H_n$ становить в середньому 15 %. Концентрації оксидів азоту зростають в усьому діапазоні навантажень, що спричинено підвищенням температури в циліндрі двигуна за роботи з добавкою водневмісного газу.

В роботах [4–7] наведено результати досліджень використання водневмісного газу для поліпшення показників дизеля. Встановлено, що добавка водневмісного газу приводить до зниження витрати палива, підвищення термічного ККД та зниження викидів продуктів неповного згорання CO та $C_m H_n$.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Оскільки автомобільні двигуни працюють з постійною зміною швидкісних і навантажувальних режимів для оцінки ефективності використання добавки водневмісного газу для поліпшення паливної економічності та екологічних показників двигуна в умовах експлуатації доцільним є проведення подальших досліджень. Зокрема необхідно провести дослідження по використанню добавки водневмісного газу в автомобільних двигунах, що працюють в різних швидкісних та навантажувальних режимах.

Мета роботи. Дослідити вплив добавки водневмісного газу на показники двигуна з іскровим запалюванням, за роботи на зрідженому нафтовому газі в різних швидкісних та навантажувальних режимах

Методи досліджень – розрахунково-теоретичні та експериментальні.

Об'єктом дослідження є вплив різних за величиною добавок водневмісного газу до повітряного заряду на показники роботи двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі в різних навантажувальних та швидкісних режимах.

Предметом дослідження є енергетичні, паливо-економічні та екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі з добавкою водневмісного газу до повітряного заряду.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для досягнення вказаної мети в лабораторії випробування двигунів кафедри «Двигуни і теплотехніка» Національного транспортного університету проведені експериментальні дослідження впливу добавки водневмісного газу на показники роботи двигуна з іскровим запалюванням. Дослідження проводили на двигуні VW BBU встановленому на гальмівному стенді.

Водневмісний газ для досліджень отримували за допомогою електролізної газової установки «Ліга-02». У якості електроліту в даній установці для проведення електролізу з отриманням водню і кисню використовували 10 % розчин гідроксиду калію. Можливо фото?

Витрату зрідженого нафтового газу під час стендових випробувань вимірювали масовим витратоміром

палива коріолісового типу FlexCOR, який було підключено в розрив паливної магістралі високого тиску між газовим балоном та редуктором, з якого відбувалося живлення двигуна під час випробувань.

Принципова схема розташування основних елементів системи живлення зрідженим нафтовим газом та системи подачі добавки водневмісного газу зображена на рис. 1.

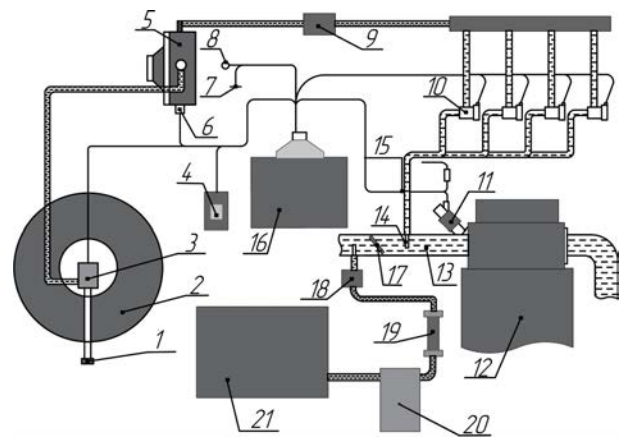


Рис. 1. Принципова схема розташування елементів системи живлення: 1 – виносний заправний пристрій; 2 – балон; 3 – мультиклапан; 4 – перемикач виду палива; 5 – редуктор випаровувач; 6 – датчик температури; 7 – заземлення на корпус автомобіля; 8 – «+» АКБ; 9 – фільтр тонкої очистки; 10 – газові форсунки; 11 – бензинова форсунка; 12 – двигун; 13 – впускний колектор; 14 – газовий штуцер; 15 – кабель емулятора бензинових форсунок; 16 – газовий ЕБК; 17 – дросельна заслінка; 18 – зворотній клапан; 19 – ротаметр для вимірювання витрати газу H_2/O_2 ; 20 – водяний затвор; 21 – генератор H_2/O_2 .

Об'ємний вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах (ВГ) (CO , CO_2 , $C_m H_n$, NO_x) і коефіцієнт надміру повітря визначали газоаналізатором Bosch BEA 060. Перед використанням в ході експериментальних досліджень прилади відкалібрували еталонними газовими сумішами.

Оцінити ефективність заходів, які здатні поліпшити паливну економічність та екологічні показники двигуна можна на підставі даних, отриманих при визначенні серії навантажувальних характеристик для всіх характерних для автомобільного двигуна в умовах експлуатації частот обертання колінчастого вала. Такий метод є досить складним і потребує значних затрат часу та матеріальних ресурсів. Тому доцільним є визначення показників роботи двигуна методом факторного експерименту.

Метою проведення трифакторного експерименту є визначення поліноміальної залежності годинних витрат палива та повітря, кута випередження запалювання, коефіцієнта надміру повітря, температури відпрацьованих газів, концентрацій шкідливих речовин від незалежних параметрів – величини добавки

водневмісного газу, частоти обертання колінчастого вала і крутного моменту. Згідно [8] таку залежність можна описати за допомогою повного багаточлену II (або III) порядку від трьох змінних, який має вигляд:

$$f(x_1, x_2, x_3) = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{11} \cdot x_1^2 + a_{22} \cdot x_2^2 + a_{33} \cdot x_3^2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

де, $a_0, a_1, a_2, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}$ – коефіцієнти апроксимації.

x_1, x_2, x_3 – фактори (x_1 – величина добавки водневмісного газу, x_2 – частота обертання двигуна, x_3 – крутний момент). Основна задача полягає у визначенні коефіцієнтів апроксимації.

Для побудови матриці експерименту визначили мінімальні, максимальні, середні значення факторів, кількість рівнів, а також крок між значеннями. Мінімальні та максимальні значення для: величини добавки водневмісного газу ($r_{H_2O_2}$) – 0 і 3 л/хв; частоти обертання колінчастого вала двигуна (n_d) – 1600 і 5000 хв⁻¹; крутного моменту (M_k) – 0 і 100 Нм.

Для більшої зручності відобразили план експерименту графічно (рис. 2), де на кожній осі відклали значення факторів, відповідно матриці експерименту (табл. 1).

План експерименту з нормованими та натуральними показниками приведено в таблиці 1.

Під час проведення експерименту послідовно, для кожної точки задавали значення крутного моменту, частоти обертання колінчастого вала двигуна, величини добавки водневмісного газу і вимірювали наступні параметри: час витрати доз палива та повітря, розрідження у впускному трубопроводі,

температуру охолоджуючої рідини, кут відкриття дросельної заслінки і кут випередження запалювання, коефіцієнт надміру повітря, концентрації CO, C_mH_m, CO₂, NO_x, O₂ у відпрацьованих газах до і після нейтралізатора. Розраховували ефективну потужність, годинну і питому витрати палива, годинну витрату повітря.

Отримані під час експерименту значення паливо-економічних та екологічних показників наведені в таблиці 2.

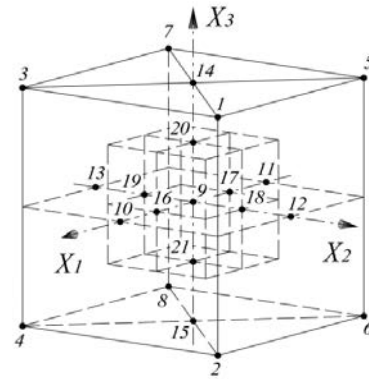


Рис. 2. Графічне зображення плану експерименту на 21 точку на п'яти рівнях для функції виду $y=f(r_{H_2O_2}, n_d, M_k)$

В результаті опрацювання факторного експерименту методом найменших квадратів отримані поліноміальні залежності, що дозволяють описати паливо-економічні та енергетичні показники двигуна за

Таблиця 1. Матриця експерименту з нормованими та натуральними показниками

№ точки	Нормовані величини			Натуральні величини		
	X ₁	X ₂	X ₃	r _{H₂O₂} , л/хв	n _d , хв ⁻¹	M _k , Нм
1	1	1	1	3	5000	100
2	1	1	-1	3	5000	0
3	1	-1	1	3	1600	100
4	1	-1	-1	3	1600	0
5	-1	1	1	0	5000	100
6	-1	1	-1	0	5000	0
7	-1	-1	1	0	1600	100
8	-1	-1	-1	0	1600	0
9	0	0	0	1.5	3300	50
10	1	0	0	3	3300	50
11	-1	0	0	0	3300	50
12	0	1	0	1.5	5000	50
13	0	-1	0	1.5	1600	50
14	0	0	1	1.5	3300	100
15	0	0	-1	1.5	3300	0
16	+0,5	0	0	2.25	3300	50
17	-0,5	0	0	0.75	3300	50
18	0	+0,5	0	1.5	4150	50
19	0	-0,5	0	1.5	2450	50
20	0	0	+0,5	1.5	3300	75
21	0	0	-0,5	1.5	3300	25

Таблиця 2. Результати трифакторного експерименту

№ точки	$\Gamma_{\text{H}_2\text{O}_2}$, л/хв	n_d , хв ⁻¹	Мк, Н·м	Гп., кг/год	СО, %	СО ₂ , %	С _м Н _н , млн ⁻¹	NO _x , млн ⁻¹
1	3	5000	100	12.870	5.103	10.53	241	927
2	3	5000	0	1.910	0.572	12.24	37	903
3	3	1600	100	3.000	0.895	11.48	199	2431
4	3	1600	0	0.934	0.341	10.4	162	172
5	0	5000	100	13.148	5.185	10.21	278	878
6	0	5000	0	2.035	0.602	12.21	37	674
7	0	1600	100	3.198	0.944	11.76	224	2372
8	0	1600	0	1.026	0.375	10.66	113	104
9	1.5	3300	50	3.224	0.567	12.96	127	3942
10	3	3300	50	3.353	0.594	12.95	128	4038
11	0	3300	50	3.625	0.593	12.96	130	3867
12	1.5	5000	50	5.782	1.428	12.66	177	3378
13	1.5	1600	50	2.021	0.444	11.74	173	2999
14	1.5	3300	100	6.282	0.885	12.99	159	3352
15	1.5	3300	0	1.459	0.476	11.62	75	585
16	2.25	3300	50	3.446	0.612	12.85	129	3947
17	0.75	3300	50	3.462	0.662	12.93	129	3861
18	1.5	4150	50	4.614	0.577	13.05	133	3775
19	1.5	2450	50	2.749	0.499	12.92	184	3670
20	1.5	3300	75	4.802	0.594	13.08	126	3977
21	1.5	3300	25	2.393	0.542	12.59	143	3182

роботи на зрідженому нафтовому газі з різними за величиною добавками водневмісного газу. Розрахунок поліноміальних коефіцієнтів виконано в програмі апроксимації розробленій на кафедрі двигунів і теплотехніки і реалізованій в середовищі MathCad.

Значення коефіцієнтів апроксимації наведені у таблиці 3.

Визначені значення коефіцієнтів поліноміальних залежностей дають змогу визначити показники витрати палива та повітря і концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах для двигуна VW ВВУ при роботі з різними за величиною добавками водневмісного газу у широкому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів.

Перевірку адекватності поліноміальних залежностей, що описують екологічні показники та показники паливної економічності двигуна здійснено за допомогою критерію Фішера (F) [8]. Критерій Фішера визначається за формулою:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{(y)}^2}, \quad (2)$$

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

Коли отримане розрахунком значення F -критерію не перевищує табличних даних $F_{\text{роз}} \leq F_{\text{таб}}$, в такому разі, з певною надійною ймовірністю модель можна вважати адекватною. Для перевірки адекватності застосовували таблиці F -критерію при 5 % рівні значущості, звідки надійна ймовірність становить 95 %.

В першу чергу необхідно визначити дисперсію адекватності заданої величини. Дисперсія адекватності являє собою остаточну суму квадратів різниць між значеннями отриманими експериментальним шляхом і розрахунковими значеннями за поліноміальними залежностями, поділену на число ступенів вільності:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i_{\text{роз}}} - Y_{i_{\text{експ}}})^2}{f} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_{i}^2}{f}, \quad (3)$$

де $Y_{i_{\text{роз}}}$ – значення в i -му досліді, розраховані за рівняннями регресії;

$Y_{i_{\text{експ}}}$ – значення в i -му досліді визначенні експериментально;

f – число ступенів вільності в плануванні експерименту, яке визначається як різниця між числом дослідів та числом коефіцієнтів, що визначаються:

$$f = N - k, \quad (4)$$

де N – число дослідів;

k – число коефіцієнтів апроксимації.

Наступним кроком визначається дисперсія відтворюваності $S_{(y)}^2$, вона визначається шляхом постановки додаткових дослідів в одній з точок за залежністю:

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1}, \quad (5)$$

де n – число додаткових дослідів,

Y_i – значення заміряних параметрів, отриманих в кожному досліді;

\bar{Y} – середнє значення заміряних параметрів.

Таблиця 3. Розраховані значення коефіцієнтів апроксимації для навантажувальних режимів двигуна VW BBU за роботи на ЗНГ

Коефіцієнти апроксимації	Параметр							
	α	θ	$G_{\text{пал}}$	$G_{\text{нов}}$	CO	CO_2	C_nH_m	NO_x
a_0	1.12	18.27	0.86	23.19	-2.25	3.08	-0.11	0.13
a_1	-0.03	3.04	1.25	11.31	2.35	0.28	0.05	-0.23
a_2	$-1.16 \cdot 10^{-4}$	$-2.88 \cdot 10^{-3}$	$5.95 \cdot 10^{-5}$	$-1.01 \cdot 10^{-2}$	$2.52 \cdot 10^{-3}$	$-1.22 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$	$-1.53 \cdot 10^{-4}$
a_3	$-1.45 \cdot 10^{-3}$	$-4.8 \cdot 10^{-2}$	$1.49 \cdot 10^{-2}$	$5.21 \cdot 10^{-2}$	$5.13 \cdot 10^{-2}$	$-3.49 \cdot 10^{-2}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$	$-4.87 \cdot 10^{-3}$
a_{11}	0.01	-1.22	-0.27	-1.41	-0.81	0.29	-0.02	0.09
a_{22}	$4.153 \cdot 10^{-8}$	$3.164 \cdot 10^{-6}$	$1.353 \cdot 10^{-8}$	$4.079 \cdot 10^{-6}$	$-8.317 \cdot 10^{-7}$	$5.817 \cdot 10^{-7}$	$-5.662 \cdot 10^{-8}$	$5.618 \cdot 10^{-8}$
a_{33}	$2.826 \cdot 10^{-5}$	$9.521 \cdot 10^{-4}$	$-1.125 \cdot 10^{-4}$	$8.25 \cdot 10^{-4}$	$-4.759 \cdot 10^{-4}$	$3.868 \cdot 10^{-4}$	$-3.166 \cdot 10^{-5}$	$6.625 \cdot 10^{-5}$
a_{12}	$6.298 \cdot 10^{-6}$	$-5.421 \cdot 10^{-4}$	$-3.721 \cdot 10^{-4}$	$-3.927 \cdot 10^{-3}$	$-5.668 \cdot 10^{-4}$	$-3.092 \cdot 10^{-4}$	$-7.064 \cdot 10^{-6}$	$4.85 \cdot 10^{-5}$
a_{13}	$2.377 \cdot 10^{-4}$	$-1.843 \cdot 10^{-2}$	$-1.264 \cdot 10^{-2}$	$-1.255 \cdot 10^{-1}$	$-2.311 \cdot 10^{-2}$	$-4.425 \cdot 10^{-3}$	$-5.42 \cdot 10^{-4}$	$1.864 \cdot 10^{-3}$
a_{23}	$3.616 \cdot 10^{-7}$	$-6.194 \cdot 10^{-5}$	$-3.687 \cdot 10^{-6}$	$5.207 \cdot 10^{-5}$	$-3.533 \cdot 10^{-5}$	$4.505 \cdot 10^{-5}$	$-5.623 \cdot 10^{-7}$	$5.187 \cdot 10^{-6}$
a_{111}	0	0	$-4.726 \cdot 10^{-2}$	$-7.328 \cdot 10^{-1}$	$5.625 \cdot 10^{-3}$	$-1.097 \cdot 10^{-1}$	$-7.845 \cdot 10^{-4}$	$-4.824 \cdot 10^{-3}$
a_{222}	$-4.614 \cdot 10^{-12}$	$-4.071 \cdot 10^{-10}$	$4.158 \cdot 10^{-12}$	$-3.48 \cdot 10^{-10}$	$8.448 \cdot 10^{-11}$	$-4.932 \cdot 10^{-11}$	$6.146 \cdot 10^{-12}$	$-5.859 \cdot 10^{-12}$
a_{333}	$-1.6 \cdot 10^{-7}$	$-1.6 \cdot 10^{-5}$	$2.429 \cdot 10^{-8}$	$-1.051 \cdot 10^{-5}$	$1.219 \cdot 10^{-6}$	$-2.207 \cdot 10^{-6}$	$1.955 \cdot 10^{-7}$	$-4.195 \cdot 10^{-7}$
a_{112}	$-2.386 \cdot 10^{-6}$	$2.451 \cdot 10^{-4}$	$1.105 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$1.972 \cdot 10^{-4}$	$3.32 \cdot 10^{-5}$	$3.58 \cdot 10^{-6}$	$-1.793 \cdot 10^{-5}$
a_{113}	$-9.556 \cdot 10^{-5}$	$8.333 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$3.505 \cdot 10^{-2}$	$7.929 \cdot 10^{-3}$	$-7.821 \cdot 10^{-4}$	$2.042 \cdot 10^{-4}$	$-6.729 \cdot 10^{-4}$
a_{122}	$1.153 \cdot 10^{-10}$	$-1.442 \cdot 10^{-8}$	$5.661 \cdot 10^{-9}$	$1.105 \cdot 10^{-7}$	$-3.871 \cdot 10^{-9}$	$3.102 \cdot 10^{-8}$	$-6.2 \cdot 10^{-10}$	$9.172 \cdot 10^{-10}$
a_{223}	$-7.439 \cdot 10^{-11}$	$6.488 \cdot 10^{-9}$	$3.036 \cdot 10^{-9}$	$2.727 \cdot 10^{-8}$	$6.173 \cdot 10^{-9}$	$-6.089 \cdot 10^{-10}$	$1.59 \cdot 10^{-10}$	$-5.239 \cdot 10^{-10}$
a_{133}	$1.333 \cdot 10^{-7}$	$-1.667 \cdot 10^{-5}$	$6.544 \cdot 10^{-6}$	$1.278 \cdot 10^{-4}$	$-4.474 \cdot 10^{-6}$	$3.585 \cdot 10^{-5}$	$-7.167 \cdot 10^{-7}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$
a_{233}	$-2.147 \cdot 10^{-9}$	$2.206 \cdot 10^{-7}$	$9.944 \cdot 10^{-8}$	$9.448 \cdot 10^{-7}$	$1.774 \cdot 10^{-7}$	$2.988 \cdot 10^{-8}$	$3.222 \cdot 10^{-9}$	$-1.614 \cdot 10^{-8}$
a_{123}	$-9.804 \cdot 10^{-9}$	$-9.804 \cdot 10^{-7}$	$-4.569 \cdot 10^{-8}$	$8.664 \cdot 10^{-7}$	$-2.216 \cdot 10^{-7}$	$1.068 \cdot 10^{-6}$	$-3.375 \cdot 10^{-8}$	$1.029 \cdot 10^{-8}$

Для визначення дисперсії відтворюваності на двигуні VW BBU провели серію дослідів в середніх точках досліджуваних зон.

Додаткові досліді зняли в середній точці експерименту, для двигуна VW BBU: $r_{H_2O_2} = 1.5$ л/хв, $n_d = 3200$ хв⁻¹, $M_k = 50$ Нм. Вимірювали витрати палива та повітря, концентрації основних компонентів відпрацьованих газів.

В табл. 3 наведено результати перевірки адекватності поліноміальних залежностей для навантажувальних режимів та середньоквадратичні відхилення поліноміальних залежностей, які описують режими середніх навантажень двигуна VW BBU.

В результаті перевірки умова $F_{\text{роз}} < F_T$ виконується, тобто поліноміальні залежності в навантажувальних режимах роботи двигуна можна вважати адекватними. Аналіз середньоквадратичних відхилень результатів отриманих за допомогою поліноміальних залежностей роботи двигуна, що описують його роботу в режимах середніх навантажень підтверджує адекватність математичної моделі.

З використанням отриманих поліноміальних залежностей було розраховано годинну витрату палива та концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна VW BBU за без добавки та з оптимальною добавкою водневмісного газу для різних швидкісних та навантажувальних режимів. Розраховані залежності показників роботи двигуна можуть бути представлені у вигляді поверхонь.

На рис. 3 показані поверхні, які описують годинну витрату палива двигуна за роботи без добавки та з добавкою 3 л/хв газу H₂/O₂.

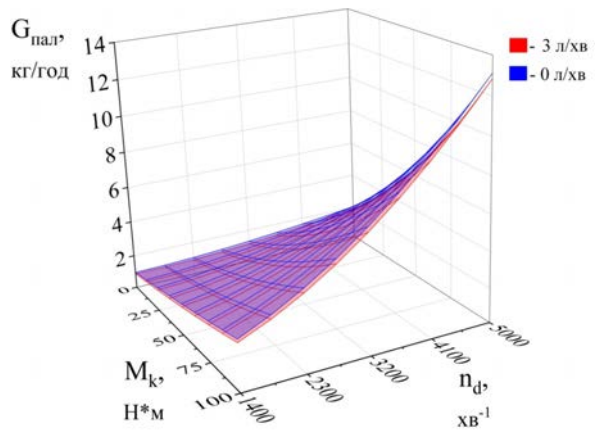


Рис. 3. Годинні витрати палива двигуна VW BBU за роботи на ЗНГ без добавки та з добавкою 3 л/хв H₂/O₂

Як видно з рисунку 3, за роботи двигуна з добавкою водневмісного газу найбільша економія палива спостерігається за роботи двигуна в режимах малих навантажень і за низьких частот обертання колінчастого вала. Зокрема за роботи двигуна при різних навантаженнях з частотою 1400 хв⁻¹ годинна витрата палива в середньому зменшується на 8.6 % порівняно з витратою палива за роботи двигуна без добавки

Таблиця 4. Результати перевірки адекватності поліноміальних залежностей за роботи двигуна VW BBU на ЗНГ

Показники роботи двигуна	Дисперсії		Значення критеріїв Фішера	
	адекватності	відтворюваності	розрахункове	табличне
	$S^2_{ад}$	$S^2_{(v)}$	F_P	F_T
α	$1.3 \cdot 10^{-5}$	0.000001	13	17
Ne	0.000169	$1.63 \cdot 10^{-5}$	10.32626	17
$G_{пал}$	0.124325	0.01	12.43251	17
$G_{пов}$	22.52934	2.333333	9.655431	17
CO	0.630522	0.07	9.007464	17
$C_n H_m$	0.000244	$2.63 \cdot 10^{-5}$	9.252676	17
NO_x	0.00667154	0.00063333	10.53401	17
CO_2	656.5267	58.33333	11.25474	17

H_2/O_2 , за роботи з частотою 5000 хв^{-1} – в середньому на 4 %. За роботи двигуна без навантаження в різних швидкісних режимах (від 1400 до 5000 хв^{-1}) витрата палива знижується в середньому на 9.9 %. При збільшенні навантаження економія палива знижується до 4.2 % за роботи з навантаженням 100 Н·м.

Поверхні, які описують зміну концентрацій оксиду вуглецю CO у відпрацьованих газах двигуна за роботи без добавки та з добавкою 3 л/хв водневмісного газу до повітряного заряду показані на рис. 4.

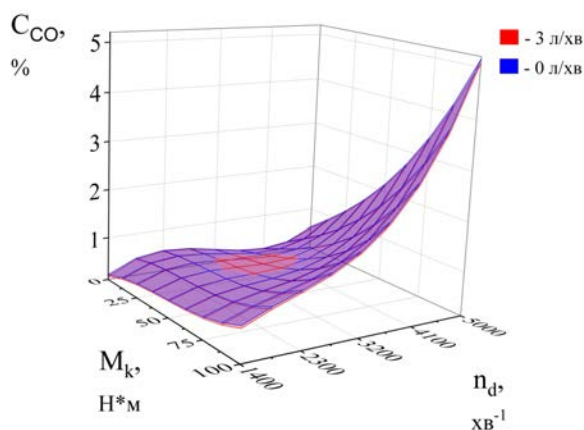


Рис. 4. Концентрації CO у відпрацьованих газах двигуна VW BBU за роботи на ЗНГ без добавки та з добавкою 3 л/хв H_2/O_2

Як видно з рисунку 4, за роботи двигуна на зріженому нафтовому газі з добавкою водневмісного газу в переважній більшості швидкісних і навантажувальних режимів знижуються концентрації оксиду вуглецю. Зокрема за роботи двигуна в різних навантажувальних режимах з частотою 1400 хв^{-1} концентрації CO знижуються в середньому на 7.7 %. Найбільше зниження концентрацій оксиду вуглецю спостерігається в режимах малих навантажень і холостого ходу. Зокрема, за роботи двигуна без навантаження в різних швидкісних режимах концентрації CO знижуються в середньому на 5.7 %. За частоти обертання колінчастого вала 1400 хв^{-1} зниження CO становить 19.8 %.

На рис. 5 показані поверхні, які описують зміну концентрацій незгорілих вуглеводнів $C_m H_n$ у відпрацьованих газах двигуна за роботи в різних швидкісних та навантажувальних режимах без добавки та з добавкою 3 л/хв водневмісного газу.

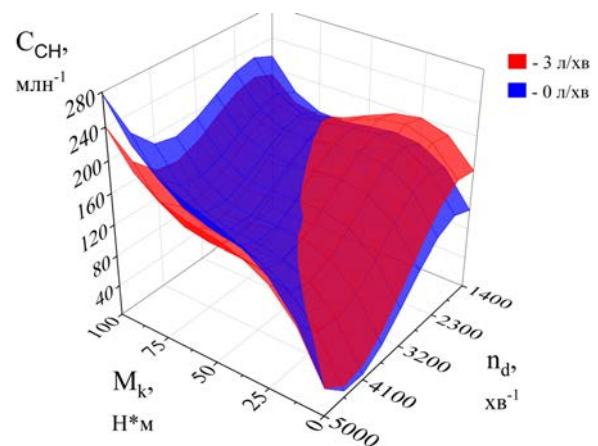


Рис. 5. Концентрації $C_m H_n$ у відпрацьованих газах двигуна VW BBU за роботи на ЗНГ без добавки та з добавкою 3 л/хв H_2/O_2

Як видно з рисунку 5, за роботи двигуна на ЗНГ з добавкою газу H_2/O_2 до повітряного заряду концентрації незгорілих вуглеводнів $C_m H_n$ в режимах малих навантажень і низьких частот обертання зростають, з підвищенням частоти обертання і крутного моменту двигуна – знижуються. Зокрема, за роботи двигуна з частотою обертання від 1400 до 2750 хв^{-1} і навантаженням від 62.5 до 100 Н·м концентрації вуглеводнів знижуються в середньому на 6.8 %; з частотою від 2750 до 3650 хв^{-1} і навантаженням від 50 до 100 Н·м – в середньому на 9.8 %; з частотою від 4100 до 4550 і навантаженням від 25 до 100 Н·м – в середньому на 11.2 %; за частоти 5000 хв^{-1} у всьому діапазоні навантажень – в середньому на 9.2 %. Разом з тим, за роботи двигуна в режимах малих навантажень і холостого ходу (з навантаженням від 0 до 37.5 Н·м) з частотою обертання колінчастого вала від 1400 до 4100 хв^{-1} добавка водневмісного газу до повітряного заряду призводить до підвищення концентрацій $C_m H_n$ (в середньому на 26.7 %).

На рис. 6 показані поверхні, які описують зміну концентрацій оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах двигуна за роботи в різних швидкісних та навантажувальних режимах без добавки та з добавкою 3 л/хв водневмісного газу.

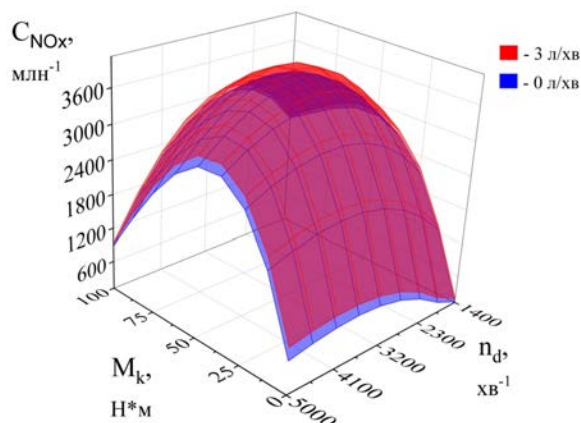


Рис. 6. Концентрації NO_x у відпрацьованих газах двигуна VW BBU за роботи на ЗНГ без добавки та з добавкою 3 л/хв H_2/O_2

Як видно з рис. 6, за роботи двигуна з добавкою водневмісного газу концентрації оксидів азоту NO_x зростають в середньому на 7.7 % у всьому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів. Зростання концентрацій оксидів азоту можна пояснити підвищенням максимальної температури в камері згорання двигуна в результаті додавання газу H_2/O_2 .

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В результаті проведених експериментальних та розрахункових досліджень отримані результати, що дозволяють оцінити вплив використання добавок водневмісного газу на паливну економічність та екологічні показники двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі. Встановлено, що добавка водневмісного газу позитивно впливає на паливну економічність двигуна в усіх швидкісних та навантажувальних режимах. Разом з тим, встановлено, що за роботи двигуна з добавкою водневмісного газу концентрації

деяких шкідливих речовин можуть, як знижуватись так і підвищуватись, в залежності від режиму роботи двигуна. Отримані результати слід враховувати при розробці алгоритму роботи систем генерації та подачі добавки водневмісного газу на борту автомобіля.

ВИСНОВКИ

1. Проведено експериментальні дослідження двигуна з іскровим запалюванням методом трифакторного експерименту для отримання поліноміальних залежностей, що описують двигун автомобіля, як споживача палива та джерела викидів шкідливих речовин за роботи на ЗНГ з добавкою та без добавки водневмісного газу. З використанням отриманих поліноміальних залежностей розраховано годинну витрату палива та концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна в залежності від величини добавки водневмісного газу, крутного моменту та частоти обертання колінчастого вала.

2. Встановлено, що за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі з добавкою 3 л/хв H_2/O_2 найбільша економія палива спостерігається за роботи двигуна в режимах малих навантажень і за низьких частот обертання колінчастого вала. Зокрема за роботи двигуна при різних навантаженнях з частотою 1400 хв^{-1} годинна витрата палива в середньому зменшується на 8.6 % порівняно з витратою палива за роботи двигуна без добавки H_2/O_2 , за роботи з частотою 5000 хв^{-1} – в середньому на 4 %. За роботи двигуна без навантаження в різних швидкісних режимах (від 1400 до 5000 хв^{-1}) витрата палива знижується в середньому на 9.9 %. При збільшенні навантаження економія палива знижується до 4.2 % за роботи з навантаженням 100 Н·м.

3. Встановлено, що концентрації CO знижуються в середньому на 7.7 – 19.8 %. Концентрації незгорілих вуглеводнів C_mH_n знижуються в середньому на 6.8–11.2 %. Концентрації оксидів азоту NO_x зростають в середньому на 7.7 % у всьому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів. Зростання концентрацій оксидів азоту можна пояснити підвищенням максимальної температури в камері згорання двигуна в результаті додавання газу H_2/O_2 .

REFERENCES

- [1] Rajasekaran, T., Duraiswamy, K., Bharathiraja, M., & Poovaragavan, S. (2015). Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 10 (1): 46–51.
- [2] Çakmak, A., Girisen, A.R., & Özcan, H. (2021). "Effects of hydroxy gas addition on the performance and emission characteristics of liquefied petroleum gas-powered lean-operated spark-ignition engine", *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 14, No. 1, 41–54.
- [3] Shuba, Y.V., & Panin, M.I. (2023). Vplyv dobavky vodnevemisnogo hazu do povitrianoho zariadu na pokaznyky dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam za roboty na zridzenomu naftovomu hazi. [The effect of the addition of hydrogen-containing gas on the performances of spark-ignition engine while using liquefied petroleum gas]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK imeni admirala Makarova - Collection of scientific works of Admiral Makarov NUS*, № 2-3, 84-92.
- [4] Ganesh Kerkal, Krishna Pawale, Amol Dhumal. (2017). "Diesel Engine with Hydrogen in Dual Fuel Mode: A Review" *IRASET journal*, ISSN 2321-9653 Vol.05, Issue 5, , May. Pages: 1306–1311.

- [5] Lokanath. M, Eswar balachandar G, Ramanjaneyulu. B, M. Venkata Subbaiah, A. H. Kiran Teja, “Performance of diesel engine by adding secondary fuel as HHO” JMCMS journal, ISSN 2454-7190 Vol.15, No. 9, September-2020, Pages: 142-153.
- [6] Prasad Kumar Putha, “Performance of I.C Engines using HHO GAS”IJSETR journal, ISSN 2319-8885 Vol. 04, Issue. 16, June-2015, Pages:2994-2998.
- [7] Dhananjay Babariya, Jay Oza, Bhavin Hirani, Gaurang Akbari“An Experimental Analysis Of S.I Engine Performance With HHO As A Fuel” IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 pISSN: 2321-7308Volume: 04 Issue: 04 ,Apr-2015.
- [8] Rafales-Lamarca, E.E., Nikolayev, V.G. (1971). Deiaki metody planuvannia ta matematychnoho analizu biolohichnykh eksperymentiv [Some methods of planning and mathematical analysis of biological experiments]. Naukova dumka, p. 117.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Rajasekaran, T., Duraiswamy, K., Bharathiraja, M., Poovaragavan, S. (2015). Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG. Journal of Engineering and Applied Sciences 10 (1): 46–51.
- [2] Çakmak, A., Girisen, A.R. and Ozcan, H. (2021). "Effects of hydroxy gas addition on the performance and emission characteristics of liquefied petroleum gas-powered lean-operated spark-ignition engine", SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol. 14, No. 1, 41–54.
- [3] Шуба, С.В., Панін, М.І. (2023). Вплив добавки водневмісного газу до повітряного заряду на показники двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі. *Збірник наукових праць НУК імені адмірала Макарова*. № 2–3 С. 84–92.
- [4] Ganesh Kerkal, Krishna Pawale, Amol Dhumal, “Diesel Engine with Hydrogen in Dual Fuel Mode: A Review” IJRASET journal, ISSN 2321-9653 Vol.05, Issue 5, , May-2017, Pages: 1306–1311.
- [5] Lokanath M, Eswar balachandar G, Ramanjaneyulu. B, M. Venkata Subbaiah, A. H. Kiran Teja, “Performance of diesel engine by adding secondary fuel as HHO” JMCMS journal, ISSN 2454-7190 Vol.15, No. 9, , September-2020, Pages: 142–153.
- [6] Prasad Kumar Putha, “Performance of I.C Engines using HHO GAS”IJSETR journal, ISSN 2319-8885 Vol. 04, Issue. 16, June-2015, Pages:2994–2998.
- [7] Dhananjay Babariya, Jay Oza, Bhavin Hirani, Gaurang Akbari“An Experimental Analysis Of S.I Engine Performance With HHO As A Fuel” IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology eISSN: 2319-1163 pISSN: 2321-7308Volume: 04 Issue: 04 ,Apr-2015.
- [8] Рафалес-Ламарка, Е.Е., Николаев, В.Г. (1971). Деякі методи планування та математичного аналізу біологічних експериментів. *Наукова думка*. С. 117.

© Шуба С. В., Панін М. І.

Дата надходження статті до редакції: 22.04.2024

Дата затвердження статті до друку: 08.05.2024