

УДК 621.43.057

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.2-3\(491-492\).11](https://doi.org/10.15589/znп2023.2-3(491-492).11)

THE EFFECT OF THE ADDITION OF HYDROGEN-CONTAINING GAS ON THE PERFORMANCES OF SPARK-IGNITION ENGINE WHILE USING LIQUEFIED PETROLEUM GAS

ВПЛИВ ДОБАВКИ ВОДНЕВМІСНОГО ГАЗУ ДО ПОВІТРЯНОГО ЗАРЯДУ НА ПОКАЗНИКИ 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

М. І. Панін,

аспірант

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

Abstract. The article considers the results of studies of the influence of the addition of hydrogen-containing gas to the air charge on the fuel efficiency and environmental performance of the gasoline engine operating on liquefied petroleum gas with different loading modes.

The object of experimental research is a modified gasoline engine VW BBY with LPG supply system and H₂/O₂ supply system. The engine was connected to break machine. The engine power supply system ensures its operation both on gasoline and LPG. The hydrogen-containing gas supply takes place in the intake manifold in front of the throttle. A 10% solution of electrolytic salt of KOH was used as an electrolyte for electrolysis to generate hydrogen and oxygen. The purpose of the work is to determine the effect of adding hydrogen-containing gas to the air charge on the fuel efficiency and environmental performance of a gasoline engine with liquefied petroleum gas supply system when operating under different loading modes.

Methods of research – experimental.

To determine the optimal amount of the addition of hydrogen-containing gas while engine runs on liquefied petroleum gas, the engine control characteristics were determined when engine imitated the movement that matches the midpoint of the European urban driving cycle. It was assumed that the addition is optimal when we have maximum fuel economy but also we take into account the electrical energy consumption for hydrogen-containing gas production. It has been determined that considering the electrical energy consumption the better amount of gas will be at the level of 4...6%. As a result of the research, it has been established that the addition of hydrogen-containing gas positively affects the fuel-economic and energy performance of the gasoline engine in different loading modes. In low load modes the specific effective fuel consumption reduced by 8%. In other modes the fuel economy is observed on average 3.5%. When the optimal hydrogen-containing gas addition is used, C_mH_n concentration decreases by 15% on average, which indicates about more complete combustion of the fuel-air mixture. Due to rise of temperature in the engine cylinders, the NO_x concentration increases.

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

Анотація. У статті розглянуто результати досліджень впливу добавки водневмісного газу до повітряного заряду на паливну економічність та екологічні показники бензинового двигуна, який працює на зрідженому нафтовому газі, в різних навантажувальних режимах.

Об'єкт експериментальних досліджень – бензиновий двигун 4Ч 7.65/7.56 (VW BBY), який дообладнано системами живлення зрідженим нафтовим газом і подачі водневмісного газу і приєднаний до гальмівної машини. Подача водневмісного газу відбувається у впускний трубопровід перед дросельною заслінкою. У якості електроліту в даній установці для проведення електролізу з отриманням водню і кисню використовували 10% розчин гідроксиду калію.

Мета роботи – визначення впливу добавки водневмісного газу до повітряного заряду на паливну економічність та екологічні показники бензинового двигуна при роботі на зрідженому нафтовому газі в різних навантажувальних режимах.

Метод дослідження – експериментальний.

Для визначення оптимальної величини добавки водневмісного газу за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі були визначені регульовальні характеристики двигуна за роботи в режимі, що відповідає середній точці Європейського міського їздового циклу. Оптимальною вважали добавку за якої спостерігається максимальна економія палива з врахуванням витрат електричної енергії на її отримання. Встановлено, що з врахуванням витрат електричної енергії доцільно обмежити величину добавки водневмісного газу на рівні 4...6 %.

Для встановлення впливу добавки водневмісного газу на паливну економічність та екологічні показники двигуна в різних навантажувальних режимах були визначені навантажувальні характеристики за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі без добавки та з оптимальною добавкою водневмісного газу.

В результаті досліджень встановлено, що добавка водневмісного газу позитивно впливає на паливо-економічні та енергетичні показники бензинового двигуна в різних навантажувальних режимах. Зокрема, в режимах малих навантажень зниження питомої ефективної витрати палива становить 8 %. В інших режимах економія палива становить в середньому 3.5 %. За роботи двигуна з оптимальною добавкою водневмісного газу знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів (C_mH_n), що свідчить про більш повне згорання суміші. Зниження концентрацій C_mH_n становить в середньому 15 %. За рахунок підвищення температури в циліндрах двигуна дещо зростають концентрації оксидів азоту.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Незважаючи на тенденцію до використання електричних силових установок на транспорті, двигуни внутрішнього згорання ще тривалий час залишатимуться основним джерелом енергії для колісних транспортних засобів. Ці двигуни є одними із основних забруднювачів навколишнього середовища і споживачів палив нафтового походження. Тому актуальним є пошук і впровадження енергозберігаючих і природоохоронних заходів, які можна реалізувати без значної зміни конструкції двигуна. До таких заходів, що легко впровадити в умовах експлуатації є використання альтернативних палив та інтенсифікація процесу згорання в двигунах використанням активуючих добавок. Найбільш поширеним в Україні альтернативним паливом на автомобільному транспорті є зріджений нафтовий газ (ЗНГ), який є сумішшю легкоконденсуючих при стисненні газоподібних вуглеводнів. Їх основними компонентами є пропан і бутан. Широке використання даного палива обумовлено рядом його фізико-хімічних властивостей та нижчою вартістю. Разом з тим, об'ємна витрата ЗНГ на 15...20 % вища за витрату бензину, що спонукає до пошуку шляхів економії палива [1, с. 132].

До активуючих добавок належить водень або речовини, які містять його в своєму складі. Однією з таких добавок є водневмісний газ, який складається з молекул і атомів водню і кисню. Цей газ отримують електролізом водних розчинів лугів або кислот і подають у впускний трубопровід двигуна до повітряного заряду.

В статті наведені результати експериментальних досліджень використання добавки водневмісного газу до повітряного заряду для поліпшення показників

двигуна з іскровим запалюванням, який працює на зрідженому нафтовому газі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питанням використання добавок водню або водневмісного газу для поліпшення показників двигунів внутрішнього згорання присвячено багато робіт. Переважна більшість досліджень проведена закордонними вченими.

Дослідження процесу згорання аміаку, як перспективного безвуглецевого палива, з добавкою водню [2, с. 800], показали, що наявність додаткового водню зменшує енергію активації і скорочує тривалість згорання. В роботах [3, с. 8291; 4, с. 30817; 5, с. 608] наведені результати досліджень добавки водню в бензинових двигунах. В роботі [3, с. 8291] проведено дослідження використання добавки водню в комбінації з рециркуляцією відпрацьованих газів. В результаті встановлено зростання крутного моменту двигуна, зниження витрати палива і зниження концентрацій оксидів азоту за рахунок використання системи рециркуляції. Випробування двигуна на бензині і зрідженому нафтовому газі в режимі холостого ходу при різних частотах обертів колінчастого вала [6, с. 49] показали, що добавка H_2/O_2 призводить до зниження витрати палива незалежно від типу палива. Дослідження проведені на двигуні, що працює на суміштовому бензині з 20 % етанолу [7, с. 25788] показали, що добавка водню поліпшує процес згорання і приводить до поліпшення паливної економічності. Разом з тим встановлено зростання концентрацій оксидів азоту. Випробування чотиритактного бензинового двигуна [8, с. 5], в якому водневмісний газ подається у впускний колектор через спеціальну форсунку,

показали, що добавка приводить до зниження викидів CO і C_mH_n . При роботі двигуна на бензині з добавкою водневмісного газу встановлено, що витрата палива знизилася в середньому на 9,65%, а при роботі двигуна на зрідженому нафтовому газі – на 15,7%. В роботах [9, с. 22283; 10, с. 19638; 11, с. 25486] наведені результати досліджень впливу добавки водневмісного газу на паливну економічність та екологічні показники дизелів. Встановлено, що добавка водневмісного газу приводить до зменшення витрати палива та зниження концентрацій шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

Результати досліджень впливу добавки H_2/O_2 на показники роботи бензинових двигунів при роботі на ЗНГ наведено в роботах [12, с. 110; 13, с. 51]. Наведені результати свідчать про позитивний вплив добавки водневмісного газу на паливну економічність, енергетичні та екологічні показники двигунів.

В роботі [14, с. 4] досліджували вплив суміші ЗНГ- H_2/O_2 на роботу одноциліндрового двигуна з іскровим запалюванням. Дослідження проводили при постійній добавці в розмірі 4.72 л/хв. Встановлено, що в порівнянні з роботою на ЗНГ концентрації CO у відпрацьованих газах при використанні ЗНГ- H_2/O_2 зменшились на 48.1%, концентрації CO_2 та вуглеводнів C_mH_n зменшились на 9% та 21.8% відповідно. Встановлено, що при використанні добавки газу H_2/O_2 підвищується термічний ККД двигуна на 13 % і зменшується витрата палива на 11 %. В результаті підвищення температури в камері згоряння концентрації оксидів азоту NO_x збільшились на 6.5 %.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Аналіз раніше проведених досліджень показав, що питання використання активуючих добавок для поліпшення показників роботи автомобільних двигунів є актуальним і потребує подальших досліджень. Зокрема необхідно провести дослідження по використанню добавки водневмісного газу в автомобільних двигунах, що працюють на різних видах альтернативних палив і розробити рекомендації щодо оптимального використання добавок водневмісного газу в умовах експлуатації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

визначення впливу добавки водневмісного газу до повітряного заряду на паливну економічність та екологічні показники бензинового двигуна за роботи на зрідженому нафтовому газі.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

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.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

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

Експериментальні дослідження впливу добавки водневмісного газу на показники роботи бензинового двигуна проведені в лабораторії випробування двигунів кафедри «Двигуни і теплотехніка» Національного транспортного університету. Об'єктом досліджень є сучасний двигун з іскровим запалюванням VW BBU (4Ч 7.65/7.56) встановлений на гальмівному стенді (рис. 1).

Двигун 4Ч 7.65/7.56 з системою впорскування бензину та зворотнім зв'язком обладнаний електронною системою управління Magneti Marelli 4MV і двоступеневою системою нейтралізації шкідливих викидів з прискореним прогрівом та рециркуляцією відпрацьованих газів. Двигун було дообладнано системою впорскування зрідженого нафтового газу четвертого покоління STAG-4. Система живлення даного двигуна забезпечує його роботу як на бензині, так і на ЗНГ. Двигун також було дообладнано системою генерації та подачі добавки водневмісного газу H_2/O_2 . Подача водневмісного газу відбувається у впускний трубопровід перед дросельною заслінкою. 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.

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.

Вимірювання таких параметрів, як частота обертання колінчастого вала, кут випередження запалювання, кут відкриття дросельної заслінки, температура охолоджуючої рідини, температура і тиск у впускному колекторі, виконували за сигналами штатних датчиків електронної системи керування двигуном. Зчитували дані параметри за допомогою діагностичного адаптера VAG COM через діагностичний роз'єм OBD II.

Принципова схема розташування елементів системи живлення зрідженим нафтовим газом та системи подачі добавки водневмісного газу зображена на рис. 2.

Для визначення оптимальної величини добавки водневмісного газу за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі були визначені регульовальні

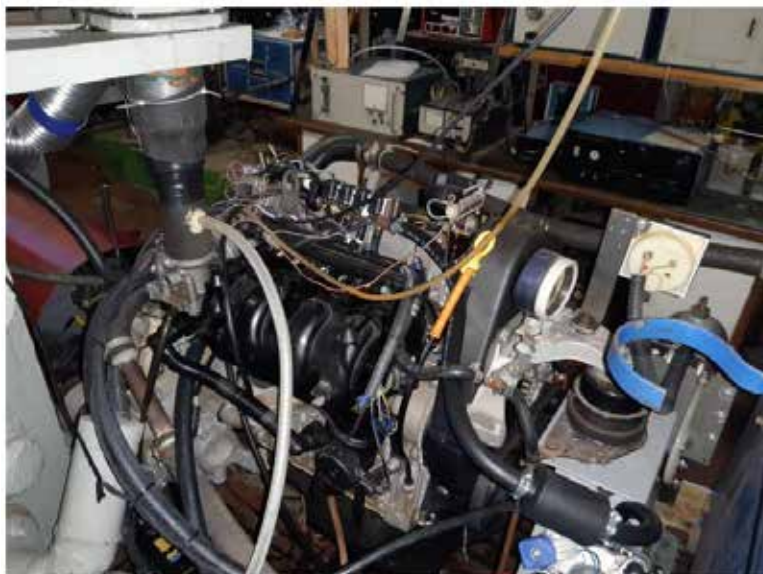


Рис. 1. двигун VW BBU із сучасною системою впорскування

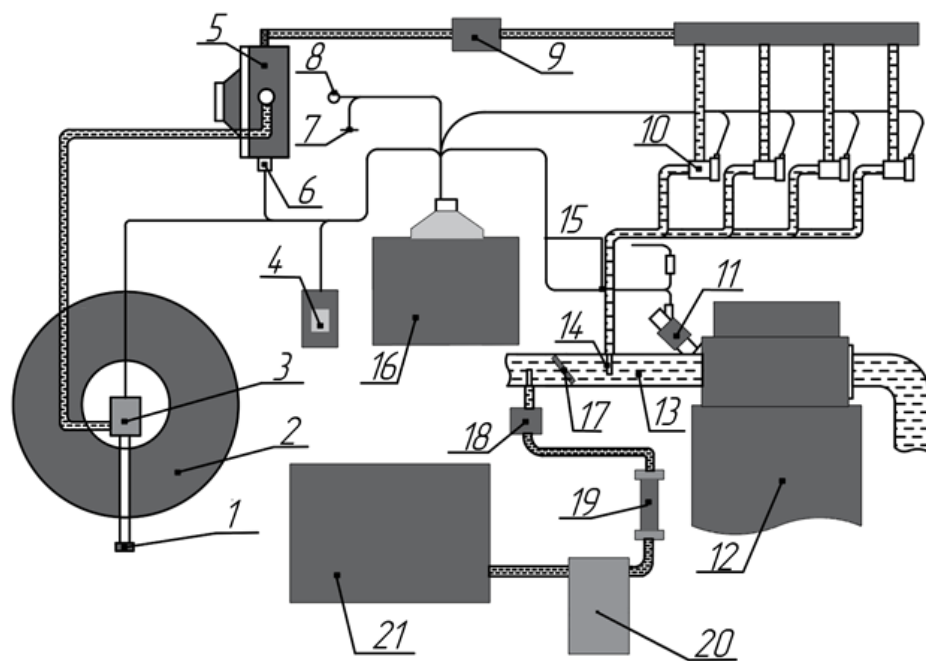


Рис. 2. Принципова схема розташування елементів системи живлення зрідженим нафтовим газом і системи подачі водневмісного газу

1 – виносний заправний пристрій; 2 – балон; 3 – мультиклапан; 4 – перемикач виду палива; 5 – редуктор випаровував; 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 .

характеристики двигуна за роботи в режимі, що відповідає середній точці Європейського міського їздового циклу. Оптимальною вважали добавку за якої спостерігається максимальна економія палива з врахуванням витрат електричної енергії на її отримання. Під час випробувань також визначали вплив добавки

на концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна. Об'ємний вміст шкідливих речовин у ВГ (CO , CO_2 , $CmHn$, NOx) і коефіцієнту надміру повітря визначали газоаналізатором Bosch BEA 060. Концентрації шкідливих речовин вимірювали до і після каталітичного нейтралізатора.

На рис. 3 приведена регулювальна характеристики двигуна з іскровим запалюванням за роботи на ЗНГ в режимі, що відповідає середній точці Європейського їздового циклу.

Величину добавки H_2/O_2 змінювали від 0 до 3 л/хв (0...4.95 % від витрати ЗНГ). Як видно з рисунку, за роботи двигуна з добавкою водневмісного газу зменшується годинна витрата палива і підвищується крутний момент двигуна. За роботи з добавкою 4.2 % водневмісного газу годинна витрата палива зменшилася на 6.73 %. Величина зростання крутного моменту за роботи з тією ж добавкою становить 13.2 %. Питома ефективна витрата палива знизилася на 17.57 %. З врахуванням затрат електроенергії на отримання водневмісного газу найбільша економія палива становить 14,15 % за роботи з добавкою 4.2 % водневмісного газу. Якщо замість затрат електроенергії враховувати теплоту, отриману при згорянні H_2/O_2 , то найбільша економія палива складає 16.6 %.

На рис. 4 показані залежності зміни концентрацій шкідливих речовин, що містяться у ВГ двигуна за роботи на зрідженому нафтовому газі, від величини добавки водневмісного газу.

Як видно з рисунку за роботи двигуна з добавкою 4.95 % H_2/O_2 концентрації незгорілих вуглеводнів

зменшуються на 17.8 %. Концентрації CO знижуються на 4.5 %. Концентрації NO_x у ВГ двигуна зростають на 25 %. Концентрації всіх шкідливих речовин, виміряних після нейтралізатора близькі до нуля і знаходяться в межах точності вимірювання.

Для встановлення впливу добавки водневмісного газу на паливну економічність та екологічні показники двигуна в різних навантажувальних режимах були визначені навантажувальні характеристики за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі без добавки та з оптимальною добавкою водневмісного газу. Отримані результати дозволяють чисельно оцінити ефективність використання добавки водневмісного газу для поліпшення паливної економічності та екологічних показників сучасного двигуна з іскровим запалюванням з системою впорскування та зворотнім зв'язком за роботи на ЗНГ.

Порівняльні навантажувальні характеристики двигуна з іскровим запалюванням за роботи на зрідженому нафтовому газі без добавки та з добавкою водневмісного газу до повітряного заряду показані на рис. 5.

Як видно з рис. 5 за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі з добавкою водневмісного газу за однакових кутів відкриття дросельних заслінок

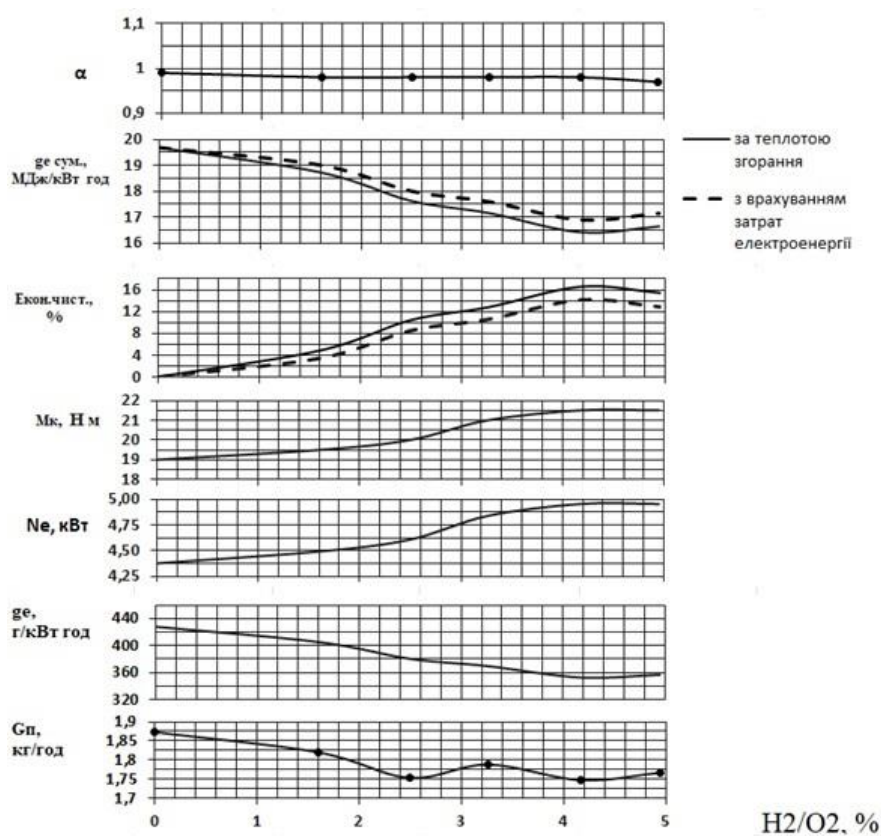


Рис. 3. Вплив добавки газу H_2/O_2 на паливну економічність та енергетичні показники двигуна 4Ч 7,65/7,56 (VW BBY) за роботи на зрідженому нафтовому газі в середній точці Європейського їздового циклу ($M_k=19$ Н м, $n=2200$ хв⁻¹)

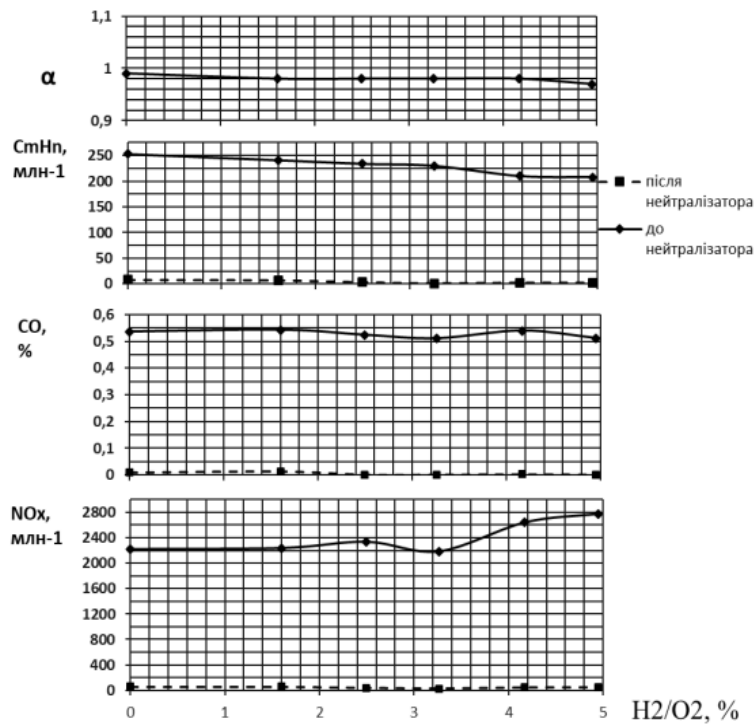


Рис. 4. Вплив добавки газу H_2/O_2 на екологічні показники двигуна 4Ч 7,65/7,56 (VW BBY) за роботи на зрідженому нафтовому газі в середній точці Європейського їздового циклу ($M_k=19$ Н м, $n=2200$ хв⁻¹)

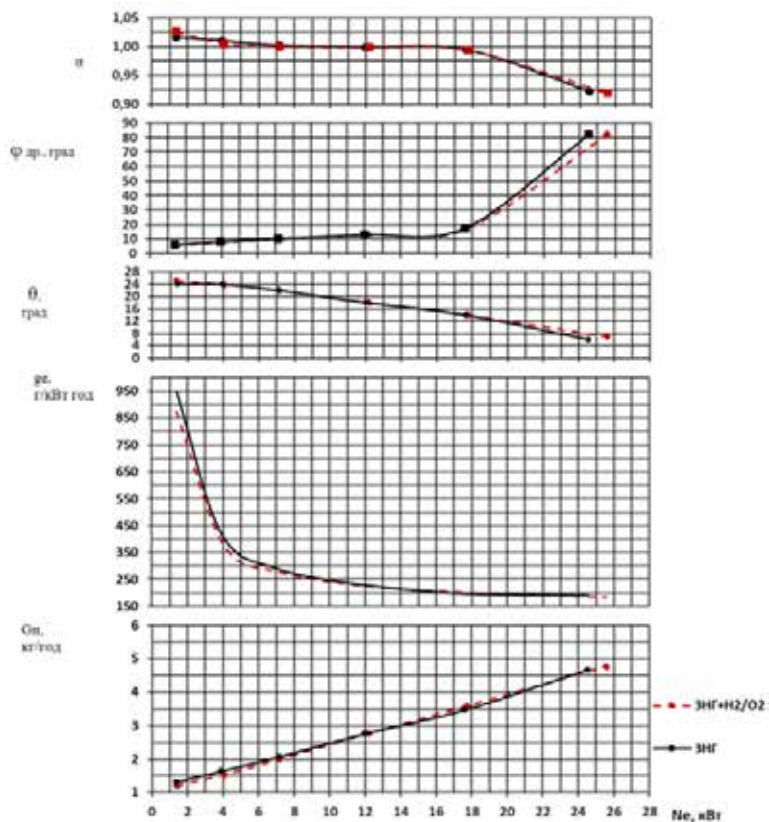


Рис. 5. Навантажувальна характеристика двигуна VW BBY за роботи на зрідженому нафтовому газі без добавки та з добавкою H_2/O_2 ($n=2200$ хв⁻¹)

максимальна потужність двигуна збільшується з 24.53 до 25.57 кВт. Приріст потужності становить 4.2 %. За роботи з навантаженням до 8 кВт дещо знижується годинна витрата палива (в середньому на 6 %). Питома ефективна витрата палива знижується в середньому на 8 % в режимах малих навантажень і на 3.82 % при великих навантаженнях.

Як видно з рисунку за роботи двигуна на зрідженому нафтовому газі з добавкою водневмісного газу до повітряного заряду кут випередження запалювання не змінюється. Це свідчить про те, що за роботи з добавкою H_2/O_2 жорсткість роботи двигуна не зростає, що можна пояснити вищою тривалістю згорання зрідженого нафтового газу [5].

Залежності зміни концентрацій шкідливих речовин у ВГ двигуна від навантаження за роботи на зрідженому нафтовому газі без добавки та з добавкою водневмісного газу показані на рис. 6.

Як видно з рисунку за роботи двигуна з іскровим запалюванням на зрідженому нафтовому газі знижуються концентрації продуктів неповного згорання у відпрацьованих газах. Зокрема, концентрації CO знижуються в середньому на 2.4 %, концентрації C_mH_n на 6 %. Разом з тим за роботи двигуна з добавкою водневмісного газу до повітряного заряду підвищуються концентрації NO_x (в середньому на 14.9 %).

ВИСНОВКИ

1. Визначені регулювальні характеристики двигуна, що працює на ЗНГ з різними за величиною добавками водневмісного газу в режимі холостого ходу та режимі, що відповідає середній точці Європейського міського їздового циклу. З врахуванням витрат електричної енергії на отримання водневмісного газу доцільно обмежити величину добавки на рівні 4...6 %.

2. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що добавка водневмісного газу позитивно впливає на паливну економічність та екологічні показники двигуна, що працює на ЗНГ в різних навантажувальних режимах. За роботи двигуна в режимі холостого ходу годинна витрата палива з врахуванням затрат електричної енергії знижується на 17,6 % за добавки 4,7 % H_2/O_2 . Знижуються концентрації монооксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів. Концентрації оксидів азоту дещо зростають. В режимі середньої точки Європейського міського їздового циклу встановлено зниження питомої ефективної витрати палива двигуна з врахуванням затрат енергії на отримання H_2/O_2 на 14,2 % за добавки 4.2 % H_2/O_2 . Концентрації незгорілих вуглеводнів зменшуються на 17 %. Концентрації CO залишаються незмінними.

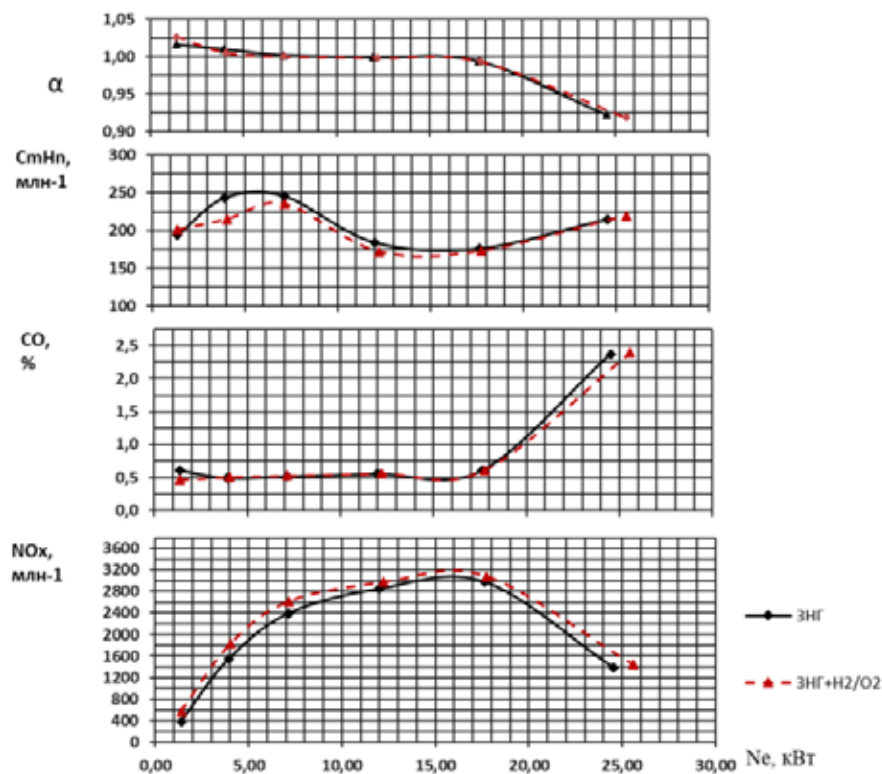


Рис. 6. Екологічні показники бензинового двигуна 4C 7.65/7.56 (VW BBY) за роботи на зрідженому нафтовому газі без добавки та з добавкою H_2/O_2 ($n=2200$ хв⁻¹)

3. Визначені порівняльні характеристики паливної економічності двигуна з іскровим запалюванням, що працює на зрідженому нафтовому газі без добавки та з добавкою водневмісного газу до повітряного заряду. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що добавка водневмісного газу позитивно впливає на паливну економічність двигуна в різних навантажувальних режимах. Зокрема, за роботи на зрідженому нафтовому газі в режимах малих навантажень зниження питомої ефективної витрати палива становить 8 %. В інших режимах економія палива становить в середньому 3.5 %.

4. Визначені порівняльні характеристики екологічних показників двигуна з іскровим запалюванням, що працює на зрідженому нафтовому газі з добавкою водневмісного газу до повітряного заряду. За роботи двигуна з оптимальною добавкою водневмісного газу знижуються концентрації незгорілих вуглеводнів ($C_m H_n$), що свідчить про більш повне згорання суміші. Зниження концентрацій $C_m H_n$ становить в середньому 15 %. Концентрації оксидів азоту (NO_x) зростають в усьому діапазоні навантажень, що спричинено підвищенням температури в циліндрі двигуна за роботи з добавкою водневмісного газу.

REFERENCES

- [1] Manko, I.V. (2014). Obgruntuvannia dotsilnosti perevedennia lehkovykh avtomobiliv na zhyvlennia zridzhenym naftovym hazom v umovakh ekspluatatsii [Expediency substantiation of conversion of a vehicle to liquefied petroleum gas in operating conditions]. Candidate's thesis. Kyiv: [in Ukrainian]
- [2] Li, J., Huang, H., Kobayashi, N., Wang, C., & Yuan, H. (2017). Numerical study on laminar burning velocity and ignition delay time of ammonia flame with hydrogen addition. *Energy*, Elsevier, 126, 796-809.
- [3] Du, Y., Yu, X., Liu, L., Li, R., Zuo, X., & Sun, Y. (2017). Effect of addition of hydrogen and exhaust gas recirculation on characteristics of hydrogen gasoline engine. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 8288-98.
- [4] Elsemary, I.M.M., Attia, A.A.A., Elnagar, K.H., & Elsaleh, M.S. (2017). Spark timing effect on performance of gasoline engine fueled with mixture of hydrogenegoline. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 30813-20.
- [5] Yu, X., Du, Y., Sun, P., Liu, L., Wu, H., & Zuo X. (2017). Effects of hydrogen direct injection strategy on characteristics of lean-burn hydrogenegoline engines. *Fuel*, 208, 602-11.
- [6] Rajasekaran, T., Duraiswamy, K., Bharathiraja, M., & Poovaragavan, S. (2015). Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 46-51.
- [7] Akansu, S.O., Tangcoz, S., Kahraman, N., Ilhak, M.I., & Aikgoz, S. (2017). Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 25781-90.
- [8] Tuan, L.A., Khanh, N.D., Huong, T.T.T., & Tai, C.V. (2013). Improving performance and reducing pollution emissions of a carburetor gasoline engine by adding HHO gas into the intake manifold. *SAE Technical Paper 2013-01-0104*. Retrieved from <https://doi.org/10.4271/2013-01-0104>.
- [9] Gad, M.S., & Abdel, R.S.M. (2021). Impact of HHO produced from dry and wet cell electrolyzers on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 43, 22277-22291
- [10] Muhammad, B.K., Ali, H.K., Muhammad, F., Khalid, J., Aqsa, S., Rehan, Z., Sadaf, F., Muhammad, R.D., Qasim, A., Ijaz, A.C., & Atabani, A.E. (2021). Impact of HHO gas enrichment and high purity biodiesel on the performance of a 315 cc diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 37, 19633-19644.
- [11] Balaji, S., & Venugopal, T. (2020). Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 46, 25479-25492.
- [12] Muhammad, S.K., Hassan, Z.B., & Iqbal, A. (2009). Influence Of Hydrogen Peroxide on Liquefied Petroleum Gas (LPG) Performance: National Conference on Postgraduate Research (NCON-PGR) 2009. (pp. 107–113).
- [13] Çakmak, A., Girisen, A.R. & 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, 1, 41-54.
- [14] Usman, M., Farooq, M., Naqvi, M., Saleem, M.W., Hussain, J., Naqvi, S.R., et al. (2020). Use of Gasoline, LPG and LPG-HHO Blend in SI Engine: A Comparative Performance for Emission Control and Sustainable Environment. *Processes* 2020, 74, 15.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Манько І.В. (2014). Обґрунтування доцільності переведення легкових автомобілів на живлення зрідженим нафтовим газом в умовах експлуатації: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.20. Київ : НТУ, 149 с.
- [2] Li, J., Huang, H., Kobayashi, N., Wang, C., & Yuan, H. (2017). Numerical study on laminar burning velocity and ignition delay time of ammonia flame with hydrogen addition. *Energy*, Elsevier, 126, 796-809.
- [3] Du, Y., Yu, X., Liu, L., Li, R., Zuo, X., & Sun, Y. (2017). Effect of addition of hydrogen and exhaust gas recirculation on characteristics of hydrogen gasoline engine. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 8288-98.
- [4] Elsemary, I.M.M., Attia, A.A.A., Elnagar, K.H., & Elsaleh, M.S. (2017). Spark timing effect on performance of gasoline engine fueled with mixture of hydrogenegoline. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 30813-20.

- [5] Yu, X., Du, Y., Sun, P., Liu, L., Wu, H., & Zuo X. (2017). Effects of hydrogen direct injection strategy on characteristics of lean-burn hydrogenegasoline engines. *Fuel*, 208, 602-11.
- [6] Rajasekaran, T., Duraiswamy, K., Bharathiraja, M., & Poovaragavan, S. (2015). Characteristics of engine at various speed conditions by mixing of HHO with gasoline and LPG. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, 46-51.
- [7] Akansu, S.O., Tangcoz, S., Kahraman, N., Ilhak, M.I., & Aikgoz, S. (2017). Experimental study of gasoline-ethanol-hydrogen blends combustion in an SI engine. *Int J Hydrogen Energy*, 42, 25781-90.
- [8] Tuan, L.A., Khanh, N.D., Huong, T.T.T., & Tai, C.V. (2013). Improving performance and reducing pollution emissions of a carburetor gasoline engine by adding HHO gas into the intake manifold. *SAE Technical Paper 2013-01-0104*. Retrieved from <https://doi.org/10.4271/2013-01-0104>.
- [9] Gad, M.S., & Abdel, R.S.M. (2021). Impact of HHO produced from dry and wet cell electrolyzers on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 43, 22277-22291.
- [10] Muhammad, B.K., Ali, H.K., Muhammad, F., Khalid, J., Aqsa, S., Rehan, Z., Sadaf, F., Muhammad, R.D., Qasim, A., Ijaz, A.C., & Atabani, A.E. (2021). Impact of HHO gas enrichment and high purity biodiesel on the performance of a 315 cc diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 37, 19633-19644.
- [11] Balaji, S., & Venugopal, T. (2020). Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 46, 25479-25492.
- [12] Muhammad, S.K., Hassan, Z.B., & Iqbal, A. (2009). Influence Of Hydrogen Peroxide on Liquefied Petroleum Gas (LPG) Performance: National Conference on Postgraduate Research (NCON-PGR) 2009. (pp. 107-113).
- [13] Çakmak, A., Girisen, A.R. & 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, 1, 41-54.
- [14] Usman, M., Farooq, M., Naqvi, M., Saleem, M.W., Hussain, J., Naqvi, S.R., et al. (2020). Use of Gasoline, LPG and LPG-HHO Blend in SI Engine: A Comparative Performance for Emission Control and Sustainable Environment. *Processes* 2020, 74, 15.

© Шуба Є. В., Панін М. І.

Дата надходження статті до редакції: 09.06.2023

Дата затвердження статті до друку: 28.06.2023