

УДК 621.436

Соломаха А.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірий О.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петренко В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Голик А.В.

Національний транспортний університет

Чирка Т.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ЗРІДЖЕНОГО ГАЗУ У ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У статті розглянуті особливості використання зрідженого газу в автомобільних двигунах, наведено основні переваги та недоліки застосування газу як моторного палива. Проведено огляд сучасних схемних рішень щодо можливості заміни рідкого нафтового палива газоподібним. Доведено перспективність застосування газу, що дає змогу підвищити паливну економічність транспорту, а також покращити його екологічні показники.

Ключові слова: зріджений газ, система живлення двигуна, екологія.

Постановка проблеми. Автомобільний транспорт відноситься до числа найбільш «енергоємних» галузей господарства країни. Він є найбільшим споживачем рідкого палива, що отримується з нафти, світові запаси якої постійно скорочуються. У зв'язку з обмеженістю запасів невідновлюваних природних ресурсів провідні країни світу активно переорієнтовуються на альтернативні джерела енергії, які можна використовувати замість традиційного моторного палива. Іншою причиною підвищеної уваги до нетрадиційного моторного палива є його відносна екологічність.

У зв'язку з проблемами дефіциту енергоресурсів і першочергових задач щодо покращення екології у всіх розвинених країнах ведеться напружений пошук та адаптація до умов експлуатації заміників традиційних видів палива – так званого альтернативного палива [4–7], що умовно можна поділити на чотири категорії:

– традиційне нафтове паливо (бензин, дизельне паливо) з додаванням синтетичних компонен-

тів, які покращують ті чи інші властивості цього палива або зменшують його витрату;

– синтетичне паливо, що отримують шляхом переробки кам'яного вугілля, горючих сланців, природного газу;

– водень та електроенергія;

– спиртове паливо, олії, біогаз, природний та нафтовий газ.

За підрахунками екологів, у великих містах близько 70% всіх шкідливих викидів в атмосферу припадають на автомобілі [1; 2]. Матеріальні затрати на паливо в сфері експлуатації на бензині становлять 25–30% собівартості перевезень, а з газовими двигунами – тільки 10–15% [3]. Це дає можливість скорішого вирішення завдання широкого використання газового палива на автомобільному транспорті.

Зріджений нафтовий газ (далі – ЗНГ) у багатьох роботах розглядається як основне альтернативне джерело енергії [8–10]. Основними компонентами ЗНГ є пропан і бутан.

Виробництво ЗНГ безпосередньо пов'язане з нафтопереробною промисловістю, а його вико-

Основні властивості палива

Властивість/паливо	Бензин	Дизель	ЗНГ	СПГ
Хімічна формула	C_7H_{17}/C_4 до C_{12}	C_8 до C_{25}	C_3H_8/C_4H_{10}	CH_4
Октанове число	86-94	8-15	105+	120+
Нижча теплота згоряння (МДж/м ³)	43,44	42,79	46,6	47,14
Вища теплота згоряння (МДж/м ³)	46,53	45,76	50,15	52,20
Стехіометричний коефіцієнт Повітря/паливо	14,7	14,7	15,5	17,2
Густина при 15°C, кг/м ³	737	820-950	1,85/505	0,78
Температура самозаймання, К	531	588	724	755-905
Питома вага	0,72-0,78	0,508	0,85	0,424

ристання дає змогу забезпечити економію рідкого палива на транспорті і більш низькі викиди шкідливих речовин. Загалом, звільняються ресурси рідкого палива, а також знижується забруднення повітряного басейну.

Все перераховане робить переобладнання транспортних засобів на стиснутий та зріджений газ економічно вигідним, навіть, незважаючи на зниження максимальної потужності двигуна та незначне погіршення тягово-швидкісних показників переобладнаних автомобілів.

В Україні також триває процес збільшення кількості транспортних засобів, які працюють на зрідженому газі, зокрема і шляхом переобладнання автомобілів, які живляться рідким паливом нафтового походження. Як зазначалося вище, це дає змогу покращити еколого-економічні показники ДВЗ [11]. Крім того, важливим моментом є значно нижча вартість зрідженого газу порівняно з бензином та дизелем.

Використання газового палива у транспортній галузі спонукає розвиток широкого кола газовикористовуючого обладнання, це і безпосередньо газобалонне устаткування з необхідною електронікою, а також комплекс заправних станцій для зрідженого палива і компресорні станції для природного газу. В Україні сформувався досить ємний ринок газового палива й обладнання, необхідного для його використання на транспорті. Виробництвом цього устаткування займаються як вітчизняні, так і зарубіжні компанії [12].

Характеристики зрідженого газу як моторного палива. ЗНГ, як правило, являє собою суміш декількох газів у різних пропорціях. Композиція комерційного ЗНГ досить різноманітна, основними складниками є пропан (C_3H_8) та бутан (C_4H_{10}).

У табл. 1 наведено порівняльні властивості ЗНГ, бензину, дизельного палива та природного газу.

Газоподібна суміш палива та повітря у камерах згоряння двигуна автомобіля для ЗНГ усуває про-

блеми, пов'язані з холодним пуском, що мають місце за використання рідкого палива. ЗНГ краще дифундує в об'єм окисника, що дає змогу отримати гомогенну пальну суміш за більш низьких температур повітря, ніж це досягається під час спалювання бензину або дизельного палива. Ці якості призводять до легшого запуску, більш надійного холостого ходу, плавного прискорення та більш ефективного горіння з меншою кількістю незгорілих вуглеводнів, що наявні у відпрацьованих газах. На відміну від бензинових двигунів, які характеризуються значним рівнем емісії шкідливих речовин під час прогріву, рівень викидів із ЗНГ залишається майже без змін незалежно від його теплового стану. Випаровування ЗНГ під час розширення у разі виходу з форсунки в камері згоряння двигуна не змиває масло зі стінок циліндрів і не розбавляє його під час розігріву двигуна. Це допомагає подовжити ресурс двигуна, а також зменшити витрати на його технічне обслуговування. Позитивним моментом у цьому є високий показник співвідношення вмісту водню до вуглецю палива, що дає змогу автомобілям, які працюють на паливі зі значним вмістом пропану, запобігати утворенню нагару порівняно з бензиновими та дизельними транспортними засобами. ЗНГ забезпечує майже таку ж потужність, прискорення та крейсерські характеристики швидкості, як бензин. Високе значення октанового числа показує, що потужність двигуна та ефективність використання палива можуть бути збільшені порівняно з використанням бензину, за забезпечення надійної бездетонаційної роботи. За допомогою більш точного налаштування системи можна компенсувати меншу щільність енергії палива.

Значна кількість автомобілів з бензиновими двигунами переведена на споживання пропану шляхом застосування відносно недорогих конверсійних комплектів, що включають: регулятор/випарник, який служить для випаровування пропану з рідкої фази, та повітря/паливний змішувач,

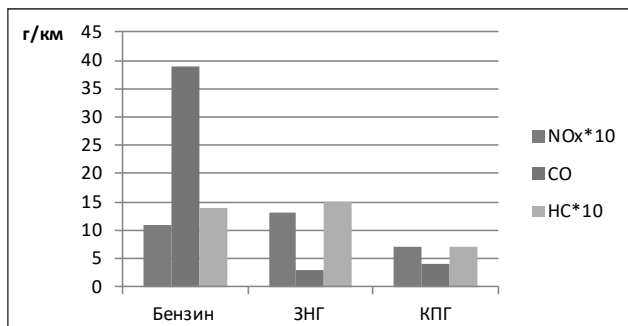


Рис. 1. Характеристики двигуна без каталітичного очищення продуктів згорання [14]

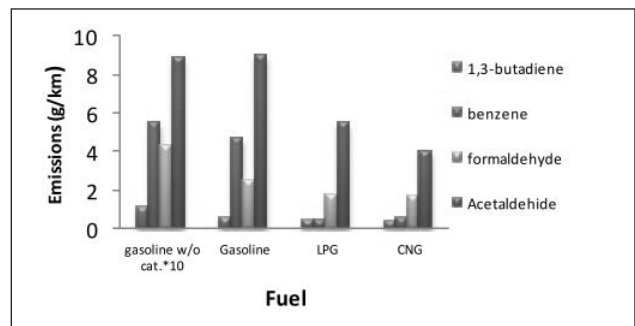


Рис. 2. Екологічні характеристики ДВЗ для різних видів палива

що призначений для вимірювання і перемішування палива з фільтрованим вхідним повітрям перед подачею у камеру згорання двигуна. Крім того, до паливного комплексу включено замкнуту схему зворотного зв'язку, яка постійно контролює вміст кисню у відпрацьованих газах і у разі потреби регулює відношення повітря/паливо. Автомобілі, що використовують ЗНГ, потребують установки спеціального паливного бака, який експлуатується у значеннях надлишкового тиску до 20 кг/см², що набагато менше, ніж для зрідженого природного газу (до 200 кг/см²).

Системи живлення двигунів із ЗНГ. Загалом технологія живлення двигунів для транспортних засобів, що працюють на ЗНГ, аналогічна до технологій для автомобілів на природному газі, за винятком того, що ЗНГ не використовується у дизелях з комбінованою схемою живлення через його досить високі детонаційні характеристики [13].

Є два варіанти двигунів з іскровим запалюванням, що працюють з використанням ЗНГ.

1. Подача палива до двигуна контролюється регулятором або випарником, який також випаровує зріджений газ. Паливо у газовій фазі потрапляє до змішувача, який розташований поблизу впускного колектора двигуна. Тут також відбувається вимірювання його витрати та перемішування з попередньо відфільтрованим повітрям і наступне спалювання вже у камері згорання ДВЗ.

2. Другий варіант являє собою двигун з іскровим запалюванням та безпосереднім впорскуванням ЗНГ до камери згорання, що насамперед покращує екологічні показники ДВЗ за забезпечення високої термічної ефективності порівняно з наявними агрегатами. Двигуни з безпосереднім впорскуванням палива у циліндри використовують технологію пошарового розподілу заряду на низьких навантаженнях, тоді як на максимальних режимах навантаження вдається забезпечити впорскування суміші, що близька до гомогенної.

Таким чином, порівняно з варіантом, коли паливо подається у впускний колектор інжекційного двигуна досягається значна економія палива, збільшується потужність. Крім того, вдається забезпечити необхідну надійність під час холодного запуску.

Вплив на навколишнє середовище. Внаслідок більшого значення октанового числа перевага як автомобільного палива віддається пропану порівняно з бутаном. Можливість більш глибокого збіднення паливної суміші пропану з бензином порівняно з чистим бензином дає змогу запобігати детонації та дає можливість збільшити коефіцієнт стиснення.

Стосовно емісійних характеристик слід зазначити значну схожість ЗНГ з природним газом. На гістограмі (рис. 1) приведено кількісні емісійні характеристики під час спалювання бензину, ЗНГ та стисненого природного газу (СПГ). Перехід з бензину на ЗНГ та СПГ призводить до суттєвого скорочення викидів CO. Використання газу також сприяє зниженню викидів NO_x.

ЗНГ має менший вміст вуглецю, ніж бензин або дизельне паливо. За використання його у двигунах з іскровим запалюванням утворюється порівняно мала кількість твердих часток, CO і помірна кількість викидів HC.

Домішки різних вуглеводнів у ЗНГ можуть впливати на склад та реакційну здатність відпрацьованих газів. Збільшений вміст олефінів у ЗНГ призводить до збільшення озonoутворюючого потенціалу відпрацьованих газів. Викиди неметановмісних вуглеводнів та CO менші, ніж на бензині. Викиди CO₂, як правило, також дещо нижчі ніж для бензину через нижчий вміст вуглецю та високе октанове значення ЗНГ. Викиди NO_x подібні до викидів від бензинових автомобілів, але їх можна ефективно контролювати, використовуючи триступеневі каталізатори. Загалом ЗНГ має більші викиди порівняно з СПГ за рахунок вищого

вмісту CO та вуглеводнів, які є більш фотохімічно активними.

Сучасні автомобілі, які працюють на двох видах палива, характеризуються значним скороченням викидів. Середні викиди за результатами випробувань та витрата палива на п'яти легкових автомобілях, які оснащені замкнутим контуром триходових каталізаторів та газобалонною установкою для ЗНГ третього покоління, наведені в таблиці 2. Випробування були проведені для міського їздового циклу [14].

Таблиця 2

**Викиди забруднюючих речовин
для двигунів на ЗНГ**

Тип двигуна	NO _x	NMHC	CO
Пасажирський автомобіль (г/км)	0,13	0,1	0,6
Вантажний автомобіль (г/к.с-год)	2,8	0,5	23,2

Сучасні двигуни, оснащені ЗНГ, а також трисступневим каталізатором можуть легко відповідати стандартам відпрацьованих газів (Euro 5 і 6). Двигуни, що працюють на збіднених сумішах, у поєднанні з каталізатором окислення можуть також досягти дуже високих емісійних показників. При цьому майже повністю відсутні викиди твердих часток.

У звіті про викиди в International Association for Natural Gas Vehicles (IANGV) показано, що викиди бензолу, формальдегіду та метанолу нижчі приблизно в 10 разів (див. рис. 2). Загалом сумарний токсичний вплив у разі переходу від бензину до газу у транспортних засобах без застосування каталітичного очищення суттєво зменшується.

У дослідженні, яке проведено в рамках Енергетичної програми системних технологічних досліджень (ETSAP), встановлено, що ЗНГ має відносно високий енергетичний потенціал на одиницю маси, але на одиницю об'єму цей показник є недостатнім. Таким чином, паливні баки для ЗНГ займають більше об'єму та дещо важчі порівняно з бензиновими або дизельними. Тестування двопаливних автомобілів показало приблизно 15% скорочення викидів парникових газів (на одиницю відстані) порівняно з експлуатацією транспорту тільки на бензині. Автомобілі з сучасною двопаливною системою живлення виробляють значно менше викидів NO_x та практично нульові викиди твердих частинок порівняно з бензином [14].

Проведені авторами статті випробування двопаливної системи живлення на автомобілі

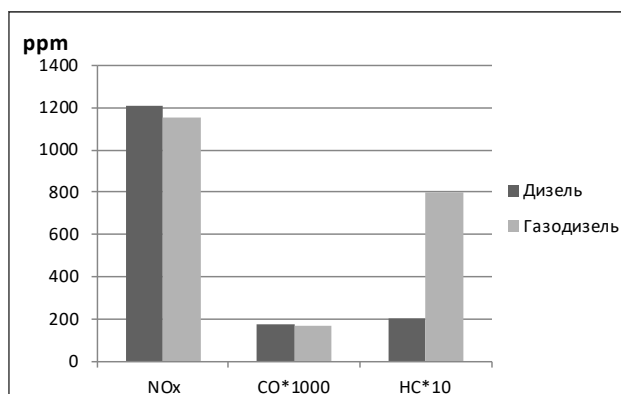


Рис. 3. Результати вимірювання екологічних показників роботи ГАЗ-3309 з дизелем Д245.7

ГАЗ-3309 з дизелем Д245.7 [16–17] засвідчили зменшення димності, яка у роботі за дизельним циклом становила 71%, а у роботі за газодизельним циклом – 9%. Під час проведення стендових випробувань були визначені концентрації монооксиду вуглецю CO, вуглеводів C_mH_n та оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах (див. рис. 3).

Концентрації вуглеводнів у повному навантаженні у роботі за газодизельним циклом становили 83 ppm при n = 1600 хв⁻¹, більшість з яких складає метан, що не згорів.

Майже всі транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, нині експлуатуються на вторинному ринку бензинових автомобілів.

Висновок. Погіршення екологічної ситуації та необхідність зменшення залежності від нафти спонукає до активного використання альтернативних видів палива, зокрема у двигунах автомобілів. Зберігається чітка тенденція зростання рухомого складу автомобільного транспорту і попиту на альтернативне паливо на фоні збільшення дефіциту рідкого палива нафтового походження. Постійно стають більш жорсткими вимоги до екологічної безпеки транспортних засобів.

Очевидно, що вирішення проблеми можливе з впровадженням найсучасніших технологій, використанням палива кращої якості та екологічності. Альтернативні види палива, такі як зріджений нафтовий газ (ЗНГ), зріджений або стиснений природний газ (ЗПГ або СПГ), у разі застосування в двигунах дають змогу значною мірою покращити екологічність автомобільного транспорту та знизити витрати палива. Особливо слід підкреслити зниження викидів оксиду вуглецю та вуглеводнів.

Двигуни з ЗНГ аналогічні бензиновим двигунам і забезпечують практично однакову продуктивність та високі характеристики згорання.

У забезпеченні відповідного законодавчого регулювання ЗНГ як альтернативне паливо може замінити приблизно 10% поточного використання нафти і тим самим суттєво скоротити рівень викидів CO, CO₂ та твердих часток транспортом.

У разі переобладнання двигунів на використання зріджених газів слід детально дослідити основні робочі параметри з метою отримання їх оптимальних значень: співвідношення повітря–паливо, робочого тиску та коефіцієнта стиснення.

Список літератури:

1. Guardiola C, Pla B., Bares P., Barbier A. An analysis of the in-cylinder pressure resonance excitation in internal combustion engines. *Applied Energy*. 2018. Vol. 228, pp. 1272–1279.
2. Mohd Fahmi Othmana, Abdullah Adama, G. Najafic, Rizalman Mamat Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. December 2017. Vol. 80, pp. 694–709.
3. Kirti Bhandari¹, Akhil Bansal, Anuradha Shukla¹ and Mukesh Khare Performance and emissions of natural gas fueled internal combustion engine: A review. 2, March 2005. *Journal of Scientific & Industrial Research*. Vol. 64, pp. 333–338.
4. Jeaduk Ryu, Ki Hyung Lee An experimental study of the flame propagation and combustion characteristics of LPG fuel. *Fuel*. June 2005, Vol. 84, Issue 9, P. 1116–1127.
5. Mustafa K.F., Gitano-Briggs H.W. Effect of variation in liquefied petroleum gas (LPG) proportions in spark ignition engine emissions. *International conference on environment*. 2008.
6. Muhammad Imran Khan, Tabassum Yasmin, Abdul Shakoор, Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51. Pp. 785–797.
7. Xuning Fenga, Minggao Ouyanga, Xiang Liua, Languang Lua, Yong Xiaa, Xiangming Hea Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*. 2018. Vol. 10. pp 246–267.
8. Elvers BS. *Handbook of fuels: energy sources for transportation*. Wiley-VCH-Verlag GmbH & Co; 2008. p. 142–149.
9. Parkash S. *Petroleum fuels manufacturing handbook: including specialty products and sustainable manufacturing techniques*. McGraw-Hill Professional Publishing; 2009. p. 4–10.
10. Alfredas Rimkus, Modestas Berioza, Mindaugas Melaika, Romualdas Juknelevičius, Zenonas Bogdanovičius. Improvement of the Compression-ignition Engine Indicators Using Dual Fuel (Diesel and Liquefied Petroleum Gas), *Procedia Engineering*, Vol. 134, 2016, pp. 30–39.
11. Дикий М.О., Петренко В.Г., Соломаха А.С., Рябов В.В., Устименко Є.В. Газодизельна система живлення автомобільного двигуна з мікропроцесорним керуванням. Наукові нотатки Луцького національного технічного університету за галузями знань «Технічні науки». Міжвузівський збірник. 2011. Вип. 31. С. 120–123.
12. Електронне джерело. URL: <http://avtotransoil.com/gaz/gbo-na-dizel-ustroystvo-sistemyi-i-printsip-raboty/>.
13. K.J. Morganti et al., The autoignition of Liquefied Petroleum Gas (LPG) in spark-ignition engines. *Proc. Combust. Inst*. 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.070>
14. Albela H.Pundkar, S.M. Lawankar, Dr. Sameer Deshmukh Performance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Vol. 3, Issue 3, March 2012. pp 1–7.
15. Lee, S., Oh, S., and Choi, Y. Performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME blended LPG fuel. *Fuel*. 2009. vol. 88, pp.1009–1015.
16. Ковбасенко С.В., Голик А.В., Петренко В.Г., Соломаха А.С., Устименко Є.В. Розробка та дослідження мікропроцесорної системи живлення дизеля, що працює за газодизельним циклом. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. № 1. Том 29(68). Ч. 3. с. 96–102.
17. Петренко В.Г., Ковбасенко С.В., Барабаш П.О., Соломаха А.С., Голик А.В. Дослідження впливу фази впорскування газового палива на показники роботи газодизеля. Наукові нотатки Луцького національного технічного університету за галузями знань «Технічні науки». Міжвузівський збірник. 2018. Вип. 62. С. 185–189.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ГАЗА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В статье рассмотрены особенности использования сжиженного газа в автомобильных двигателях, показаны основные преимущества и недостатки использования газа в качестве моторного топлива. Проведен обзор современных схемных решений по возможности замены жидкого нефтяного топлива газообразным. Доказана перспективность использования газа, что позволяет повысить топливную экономичность транспорта, а также улучшить его экологические показатели.

Ключевые слова: сжиженный газ, система питания двигателя, экология.

ECOLOGICAL ASPECTS OF THE USE OF LIQUEFIED GAS IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

In the article features of the use of liquefied gas in automobile engines are considered, the main advantages and disadvantages of using gas as motor fuel are given. An overview of modern circuit decisions on the possibility of replacing liquid petroleum gas with gaseous is made. The prospect of gas application, which allows to increase fuel efficiency of transport as well as improve its environmental performance, is proved.

Key words: liquefied gas, engine power system, ecology.