

Захарчук В.І., Захарчук О.В., Швабюк В.В., Ярощук В.В.
Луцький національний технічний університет

ПЕРЕОБЛАДНАННЯ ДИЗЕЛЯ ДЛЯ РОБОТИ НА ПРОПАН-БУТАНІ

Вирішувалась проблема зменшення собівартості перевезень за рахунок використання дешевшого моторного палива. Газові палива (природний газ та пропано-бутанові суміші) є перспективними моторними паливами. Технології переобладнання бензинових двигунів на живлення газовими паливами давно і є добре відпрацьованими. На першому етапі робіт переобладнано дизель Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на природному газі. Демонтовано дизельну паливну апаратуру, встановлено елементи системи запалювання та газову паливну апаратуру, зменшено ступінь стиску двигуна до 12 одиниць. Проведено стендові випробування двигуна, в результаті яких отримані його навантажувальні та регулювальні характеристики. Встановлено, що потужність газового двигуна на рівні базового дизеля, його еквівалентна витрата палива до 19 % більша в результаті його роботи на більш багатих сумішах, сумарна токсичність відпрацьованих газів майже в два рази менша у порівнянні з дизелем. Але природний газ має ряд суттєвих недоліків. Тому здійснено переобладнання двигуна для роботи на пропано-бутанових сумішах. Аналіз властивостей газових палив показав, що пропан-бутан має меншу детонаційну стійкість у порівнянні з природним газом. Запис сигналу датчика детонації засвідчив про наявність детонації при розгонах двигуна під навантаженням. Тому на основі розрахунків робочого циклу двигуна вибрано значення ступеня стиску 11. Зменшення ступеня стиску виконано встановленням товстішої металевої прокладки між двома штатними металоазбестовими прокладками. Стендові випробування двигуна на пропан-бутані показали збільшення еквівалентної витрати палива у порівнянні з роботою на природному газі та на дизельному паливі. Це пояснюється роботою двигуна на більш багатих паливо-повітряних сумішах. Потужність на рівні базового дизеля.

Ключові слова: дизель, газовий двигун, іскрове запалювання, природний газ, пропан-бутан

ВСТУП

Використання альтернативних видів палива є перспективним шляхом до скорочення викидів шкідливих речовин від двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), а природний газ (ПГ) є провідним варіантом. Викиди забруднюючих речовин від згоряння природного газу нижчі, ніж викиди від згоряння бензину чи дизельного палива [1], [2], і він широко доступний із розвинутою інфраструктурою зберігання та розподілу. ПГ також можна легко виробляти з відновлюваних джерел, що гарантує, що технологія, розроблена для ПГ, залишатиметься актуальною, оскільки дизельне паливо буде замінено стійким відновлюваним ресурсом.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Кілька недавніх оглядів публікацій встановили сильні та слабкі сторони сучасних двигунів внутрішнього згоряння, працюючих на природному газі [1], [3], [4], [5], [6], [7], включаючи двигуни з іскровим запалюванням (SI), двопаливні (NG, дизель) і технології прямого впорскування високого тиску (HPDI). Дуже низькі викиди можуть бути досягнуті за допомогою технології SI NG, яка використовує стехіометричну роботу з 3-компонентним нейтралізатором [8], але двигуни SI та двопаливні двигуни мають вихідну потужність, обмежену детонацією, і мають меншу ефективність порівняно зі звичайними дизельними двигунами. Двигуни на газовому паливі та газодизелі страждають від високих викидів метану [7], що призводить до значного впливу парникових газів [1]. Технологія HPDI забезпечує високу продуктивність і високу ефективність, але вимагає звичайної технології доочищення продуктів згоряння для контролю викидів NO_x і твердих частинок (PM). HPDI також вимагає високого тиску впорскування природного газу 300 бар або більше [9], що має негативні наслідки для бортових вимог до зберігання природного газу та паразитних втрат на стиснення природного газу.

Але ПГ має ряд недоліків: значна маса газових балонів та зменшення внаслідок цього вантажоспроможності автомобіля; менший пробіг автомобіля до заправки; більша вартість переобладнання.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є зменшення собівартості перевезень застосуванням дешевшого палива та розширення паливної бази підприємств автомобільного транспорту.

Завдання роботи:

виконати переобладнання двигуна для роботи на пропано-бутанових сумішах;

виконати експериментальні дослідження газового двигуна з іскровим запалюванням.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На першому етапі було виконане переобладнання дизеля Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на природному газі. Параметри базового дизеля показані в табл. 1. Метою було здійснити найпростіше переобладнання, яке можна виконувати в умовах невеликих підприємств. Конвертацію дизеля здійснено з мінімальними витратами коштів за рахунок використання серійного газового обладнання, серійної системи запалювання бензинового двигуна МеМЗ-245 і невеликих змін у конструкції двигуна. Зокрема ступінь стиснення було зменшено з 16 до 12 встановленням додаткових прокладок головки циліндрів. Тому є можливість відновлення роботи за дизельним процесом.

Таблиця 1 – Показники дизеля Д-243

Параметр	Значення
Номинальна потужність, кВт	59
Частота обертання при номінальній потужності	2200
Ступінь стиску	16
Питома ефективна витрата палива, кг/кВт год	0,238

Експериментальні дослідження газового двигуна підтвердили його працездатність в усьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів із максимальною потужністю, більшою на 1,98...4,3 %, та вищою еквівалентною питомою ефективною витратою пального до 20,5 %, ніж у дизеля, при цьому склад газоповітряної суміші близький до стехіометричного. Перед проведенням експериментів було визначено і встановлено оптимальний кут випередження запалювання.

На другому етапі за тією ж самою технологією виконане переобладнання дизеля в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропано-бутанових сумішах (рис. 1). Був встановлений газовий редуктор для скрапленого нафтового газу, виконано регулювання складу суміші, встановлений оптимальний кут випередження запалювання для роботи на даному виді палива.



Рисунок 1 – Газовий двигун з іскровим запалюванням, переобладнаний з дизеля Д-243 для роботи на пропано-бутанових сумішах

Результати досліджень. Фізико-хімічні властивості газових палив наведені в табл. 1.

З таблиці 1 видно, що основні показники пропан-бутану є прийнятними для його використання в якості моторного палива в переобладнаних з дизелів газових двигунах. Але октанове число пропано-бутанових сумішей менше, ніж природного газу. Тому на блоку циліндрів газового двигуна був встановлений датчик детонації (рис. 2) і через осцилограф Instrustar PC-Oscilloscope був здійснений на ноутбук запис його сигналу при розгонах двигуна під навантаження. Фрагмент цих записів показаний на рис. 3. Можемо бачити наявність детонації.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники основних вуглеводневих газів

Показник	Паливо			
	Природний газ	Пропан	Бутан	Дизельне паливо (для порівняння)

Нижча теплота згоряння, МДж/кг	48,7	45,7	45,4	42,5
Нижча теплота згоряння паливоповітряної суміші при певному значенні коефіцієнта надлишку повітря, МДж/м ³	3,11 (при $\alpha=1,0$)	3,46 (при $\alpha=1,0$)	3,41 (при $\alpha=1,0$)	3,2 (при $\alpha=1,2$)
Октанове число	110...130	105	94	-



Рисунок 2 – Встановлення датчика детонації на блоку циліндрів газового двигуна



Рисунок 3 – Сигнал датчика детонації в газовому двигуні

Були виконані розрахунки робочого циклу газового двигуна на пропан-бутані при різних значеннях ступеня стиску, основні результати яких показані в табл. 2. Розрахунки виконані для коефіцієнта надлишку повітря 1,15 та коефіцієнта використання тепла 0,8. Значення температури робочого тіла наприкінці згоряння в газовому двигуні більші, ніж в дизеля, але не перевищують допустимих значень для двигуна з іскровим запалюванням. Встановлено, що доцільним значенням ступеня стиску є 11.

Таблиця 2. Залежності показників газового двигуна Д-243Г від ступеня стиску

Показник	Ступінь стиску		
	$\epsilon=10$	$\epsilon=11$	$\epsilon=12$
Ефективна потужність, кВт	56,3	59,1	61,6
Питома ефективна витрата палива, кг/кВт год	0,277	0,265	0,255
Тиск в надпоршневому просторі наприкінці згоряння, МПа	3,6	4,1	4,6
Температура робочого тіла наприкінці згоряння, К	2125	2149	2170

Був проведений перший етап стендових випробувань двигуна на пропан-бутані. Під час досліджень визначались: сила, яка створює навантаження на двигун, час витрати дози палива та коефіцієнт надлишку повітря α . Далі розрахунком за відомими залежностями визначався крутий

момент двигуна, ефективна потужність та годинна витрата палива G_p (табл. 3). Для визначення коефіцієнта надлишку повітря α у вихлопній трубі був встановлений кисневий датчик (рис. 4), сигнал якого виводився на ноутбук через контролер STAG AFR широкополосного λ - зонда. Детонація двигуна відсутня.

Таблиця 3 – Результати стендових випробувань газового двигуна

Показник	Ефективна потужність, кВт					
	6,0	10,0	21,0	31,0	35,0	42,0
G_p , кг/год	4,1	5,0	7,0	8,1	10,0	11,2
α	1,03	1,15	1,15	1,15	1,15	1,11

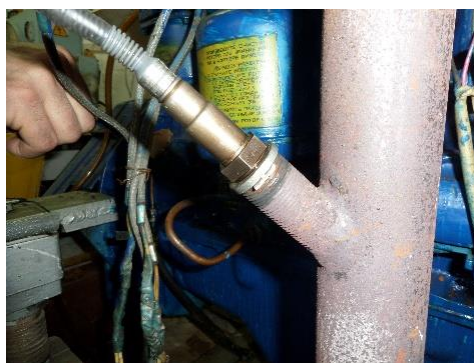


Рисунок 4 – Встановлення датчика вільного кисню у вихлопній трубі газового двигуна

Зменшення ступеня стиску газового двигуна з 12 до 11 виконано встановленням товстішої металевої прокладки між двома штатними металоазбестовими прокладками, як показано на рис. 5.

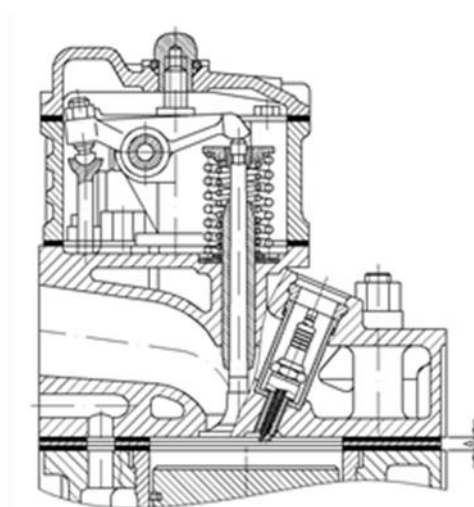


Рисунок 5 – Встановлення додаткової прокладки головки циліндрів

Потужність двигуна при роботі на пропан-бутані залишилась на рівні базового дизеля. Витрата палива є дещо більшою. Це пояснюється роботою газового двигуна на більш багатих сумішах.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Газові палива (природний газ та пропано-бутанові суміші) є перспективними моторними паливами. Пропан-бутан має ряд переваг перед природним газом. Технології переобладнання бензинових двигунів на живлення пропано-бутановими сумішами відомі ще з 70-х років минулого століття і є добре відпрацьованими. Але зараз на вантажних автомобілях і автобусах переважно встановлюються дизелі. І якщо дослідженню переобладнаних з дизелів газових двигунів на природному газі вже присвячена певна кількість робіт, то дослідження таких двигунів на пропан-бутані практично відсутні. Це підтверджує актуальність даних досліджень.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз властивостей пропан-бутану показав, що він є хорошим паливом для двигунів з іскровим запалюванням з високим ступенем стиску. Виконано переобладнання дизеля, встановленого на стенді, в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропан-бутані.

2. Результати стендових випробувань двигуна на пропано-бутанових сумішах підтвердили роботоздатність газового двигуна. Отримані енергетичні та паливо-економічні показники підтвердили доцільність переобладнання дизелів для роботи на пропан-бутані. Це дозволить зменшити собівартість перевезень за рахунок використання дешевшого палива. Наступним етапом робіт є отримання характеристик двигуна з заміром концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Korakianitis, T., Namasivayam, A.M., Crookes, R.J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions / *Prog Energy Combust Sci*, 03601285, 37 pp. 89-112. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128510000377>.

2. Saanum, I., Bysveen, M., Tunestål, P., Johansson, B. (2007). Lean burn versus stoichiometric operation with EGR and 3-way catalyst of an engine fueled with natural gas and hydrogen enriched natural gas / *SAE Tech Pap*. <https://saemobilus.sae.org/papers/lean-burn-versus-stoichiometric-operation-egr-3-way-catalyst-engine-fueled-natural-gas-hydrogen-enriched-natural-gas-2007-01-0015>.

3. Chala, G.T., Aziz, A.R.A., Hagos, F.Y. (2018). Natural gas engine technologies: Challenges and energy sustainability issue / *Energies*, 19961073, 11, <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2934>.

4. Chen, H., He, J., Zhong, X. (2019). Engine combustion and emission fuelled with natural gas: A review/ *J Energy Inst*, 17460220, 92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967118304446?via%3Dihub>.

5. Li, M., Wu, H., Zhang, T., Shen, B., Zhang, Q., Li, Z. (2020). A comprehensive review of pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: Factors affecting combustion, emissions and performance/ *Renew Sustain Energy Rev*, 18790690, 119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308597?via%3Dihub>.

6. Algayyim, S.J.M., Saleh, K., Wandel, A.P., Fattah, I.M.R., Yusaf, T., Alrazen, H.A. (2024). Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: A review/ *Fuel*, 00162361, 362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123034580?via%3Dihub>.

7. Wei, L., Geng, P. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance/ *Fuel Process Technol*, 03783820, 142 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382015301715?via%3Dihub>.

8. Draper, R., Lenski, B., Foltz, F.J., Beazley, R., Tenny, W. (2017). Measured and predicted performance of a downsized, medium duty, natural gas engine/ *SAE Tech Pap*, 01487191, 2017-March <https://saemobilus.sae.org/papers/measured-predicted-performance-a-downsized-medium-duty-natural-gas-engine-2017-01-0775>.

9. McTaggart-Cowan, G., Mann, K., Huang, J., Singh, A., Patychuk, B., Zheng, Z.X., et al. (2015). Direct injection of natural gas at up to 600 bar in a pilot-ignited heavy-duty engine/ *SAE Int J Engines*, <https://saemobilus.sae.org/articles/direct-injection-natural-gas-600-bar-a-pilot-ignited-heavy-duty-engine-2015-01-0865>.

10. Zakharchuk, V., Zakharchuk, O., Tolstushko, M., Tolstushko, N. (2024). Improving performance of wheeled tractor with gas engine as part of transport machine unit. *Engineering For Rural Development*, Vol. 23, 488-494. <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF091>.

REFERENCES

1. Korakianitis, T., Namasivayam, A.M., Crookes, R.J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions / *Prog Energy Combust Sci*, 03601285, 37 pp. 89-112. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128510000377>.

2. Saanum, I., Bysveen, M., Tunestål, P., Johansson, B. (2007). Lean burn versus stoichiometric operation with EGR and 3-way catalyst of an engine fueled with natural gas and hydrogen enriched natural gas / *SAE Tech Pap*. <https://saemobilus.sae.org/papers/lean-burn-versus-stoichiometric-operation-egr-3-way-catalyst-engine-fueled-natural-gas-hydrogen-enriched-natural-gas-2007-01-0015>.

3. Chala, G.T., Aziz, A.R.A., Hagos, F.Y. (2018). Natural gas engine technologies: Challenges and energy sustainability issue / *Energies*, 19961073, 11, <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/2934>.

4. Chen, H., He, J., Zhong, X. (2019). Engine combustion and emission fuelled with natural gas: A review/ J Energy Inst, 17460220, 92. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967118304446?via%3Dihub>.
5. Li, M., Wu, H., Zhang, T., Shen, B., Zhang, Q., Li, Z. (2020). A comprehensive review of pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: Factors affecting combustion, emissions and performance/ Renew Sustain Energy Rev, 18790690, 119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119308597?via%3Dihub>.
6. Algayyim, S.J.M., Saleh, K., Wandel, A.P., Fattah, I.M.R., Yusaf, T., Alrazen, H.A. (2024). Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: A review/ Fuel, 00162361, 362. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123034580?via%3Dihub>.
7. Wei, L., Geng, P. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance/ Fuel Process Technol, 03783820, 142 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378382015301715?via%3Dihub>.
8. Draper, R., Lenski, B., Foltz, F.J., Beazley, R., Tenny, W. (2017). Measured and predicted performance of a downsized, medium duty, natural gas engine/ SAE Tech Pap, 01487191, 2017-March <https://saemobilus.sae.org/papers/measured-predicted-performance-a-downsized-medium-duty-natural-gas-engine-2017-01-0775>.
9. McTaggart-Cowan, G., Mann, K., Huang, J., Singh, A., Patychuk, B., Zheng, Z.X., et al. (2015). Direct injection of natural gas at up to 600 bar in a pilot-ignited heavy-duty engine/ SAE Int J Engines, <https://saemobilus.sae.org/articles/direct-injection-natural-gas-600-bar-a-pilot-ignited-heavy-duty-engine-2015-01-0865>.
10. Zakharchuk, V., Zakharchuk, O., Tolstushko, M., Tolstushko, N. (2024). Improving performance of wheeled tractor with gas engine as part of transport machine unit. Engineering For Rural Development, Vol. 23, 488-494. <http://dx.doi.org/10.22616/ERDev.2024.23.TF091>.

V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, V. Shvabyuk, V. Yaroshuk. Conversion of a diesel engine to operate on propane-butane

The problem of reducing transportation costs by using cheaper motor fuel was addressed. Gaseous fuels (natural gas and propane-butane mixtures) are promising motor fuels. The technologies for converting gasoline engines to run on gaseous fuels have been well-developed for a long time. At the first stage of the work, the D-243 diesel engine was converted into a gas engine with spark ignition to operate on natural gas. The diesel fuel system was removed, ignition system components and gas fuel equipment were installed, and the engine's compression ratio was reduced to 12. Bench tests of the engine were conducted, during which its load and control characteristics were obtained. It was found that the power of the gas engine remained at the level of the base diesel engine, its equivalent fuel consumption was up to 19% higher due to operation on richer mixtures, and the total toxicity of exhaust gases was almost twice as low compared to the diesel engine. However, natural gas has several significant drawbacks. Therefore, the engine was converted to operate on propane-butane mixtures. An analysis of gaseous fuel properties showed that propane-butane has lower detonation resistance compared to natural gas. The knock sensor signal recording confirmed the presence of detonation during engine acceleration under load. Based on engine cycle calculations, a compression ratio of 11 was selected. The compression ratio was reduced by installing a thicker metal gasket between two standard metal-asbestos gaskets. Bench tests of the engine running on propane-butane showed an increase in equivalent fuel consumption compared to operation on natural gas and diesel fuel. This is explained by the engine running on richer air-fuel mixtures. The power remained at the level of the base diesel engine.

Keywords: diesel, gas engine, spark ignition, natural gas, propane-butane.

ЗАХАРЧУК Віктор Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: victavto@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5450-391X>

ЗАХАРЧУК Олег Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9265-4647>

ШВАБЮК Володимир Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: shvabyuk@meta.ua. <https://orcid.org/0000-0001-8294-5291>

ЯРОШУК Віктор Віталійович, аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: victoryaroshuk@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0007-1377-7635>.

Victor ZAKHARCHUK, Doctor of Science in Engineering, Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: victavto@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5450-391X>

Oleg ZAKHARCHUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: Zaharchukov205@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-9265-4647>.

Volodymyr SHVABYUK, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: shvabyuk@meta.ua. <https://orcid.org/0000-0001-8294-5291>

Viktor YAROSCHUK, graduate student of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: victoryaroshuk@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0007-1377-7635>.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1725