

Захарчук В.І., Захарчук О.В., Скалига М.М., Ципящук А.Л.
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕОБЛАДНАНОГО З ДИЗЕЛЯ ГАЗОВОГО ДВИГУНА НА ПРОПАН-БУТАНІ

Газові двигуни є перспективним напрямом розвитку сучасного транспорту завдяки поєднанню високої екологічності та економічної доцільності їх використання. Газові палива забезпечують більш повне й рівномірне згоряння, що сприяє зниженню викидів шкідливих речовин, покращенню робочих характеристик двигуна, зменшенню експлуатаційних витрат і підвищенню ресурсу силових агрегатів. Пропан-бутан має ряд переваг перед природним газом у разі його використання в автомобільній техніці. Аналіз його фізико-хімічних властивостей засвідчив високі значення теплоти згоряння як самого палива, так і паливо-повітряної суміші, а октанове число незначно менше, ніж у природного газу. Виконано переобладнання дизеля Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропан-бутані за тією ж технологією, що і для роботи на природному газі. Але ступінь стиску двигуна зменшили до 11 одиниць. Стендові випробування переобладнаного з дизеля газового двигуна на пропан-бутані засвідчили його роботоздатність. Потужність газового двигуна на рівні базового дизеля. Годинна витрата палива є дещо більшою внаслідок роботи газового двигуна на більш багатих паливоповітряних сумішах. Викиди оксиду вуглецю і вуглеводнів газового двигуна є дещо більшими, але в його відпрацьованих газах відсутня сажа. Тому сумарна токсичність відпрацьованих газів газового двигуна буде меншою, ніж у дизеля. При переході на газове паливо затрати на паливо-мастильні матеріали зменшуються майже у два рази. Термін окупності інвестицій на конвертацію складає від 9 до 16 місяців. За даних умов автотракторну техніку більш доцільно переобладнати для роботи на пропан-бутані, оскільки його ціна менша у порівнянні з природним газом і витрати на переобладнання також менші, відсутнє зменшення корисної вантажопідйомності транспортного засобу.

Ключові слова: дизель, газовий двигун, переобладнання, пропан-бутан, газове паливо, витрата палива, екологічні показники

ВСТУП

Газові двигуни є екологічно чистими системами з меншими викидами забруднюючих речовин у повітря, ніж звичайні бензинові та дизельні двигуни. Скраплений нафтовий газ, паливо з низьким вмістом вуглецю, характеризується низьким рівнем викидів під час спалювання. Це паливо дешевше, ніж дизельне паливо, що зменшує витрати на експлуатацію. Крім того, можна зменшити витрати на технічне обслуговування, оскільки всередині двигунів на зрідженому газі накопичується менше нагару. Оскільки скраплений газ використовувався як автомобільне паливо протягом десятиліть, було підтверджено, що він має додаткові переваги щодо сумісності обладнання та інфраструктури порівняно з новими екологічними видами палива, які зараз розробляються. Таким чином, газові двигуни можуть бути використані для заміни та модернізації застарілих дизельних двигунів у важких вантажівках і будівельній техніці. Однак попередні дослідження обмежувалися лише порівнянням викидів вихлопних газів дизельних і газових двигунів. У цьому дослідженні порівнювалися викиди вихлопних газів і продуктивність цих двигунів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

За прогнозами, у 2026 році споживання викопного палива зросте приблизно на 1,4 мільйона барелів на день [1], а двигуни із запалюванням від стиснення визнані однією з головних причин забруднення повітря [2]. Альтернативні джерела палива мають вирішальне значення для задоволення цього зростання потреби в енергії [3] і для зменшення шкоди навколишньому середовищу, спричиненої викопним паливом. У цьому дослідженні пропан-бутан є життєздатною заміною в двигунах із запалюванням від стиснення [4]. З економічної точки зору, пропан-бутан є майже таким же привабливим, як рідкий природний газ (ПГ) як джерело енергії [5] для зменшення викидів вуглецю, оскільки він пропонує коротші періоди окупності, зменшує інвестиційні витрати [6] і менш вразливий до змін цін на паливо [7]. Крім того, пропан-бутан не виділяє забруднювачів у разі витоків, на відміну від існуючих нафтопродуктів, таких як дизельне паливо [8], і має аналогічні переваги щодо викидів ПГ. Використання пропану-бутану покращує процес горіння [9] і зменшує викиди твердих частинок і сажі, що призводить до низьких викидів CO і CH [10]. У дизельних двигунах пропан-бутан має більший крутний момент і термічний ККД через його більшу теплотворну здатність [11]. Це також допомагає зменшити викиди NO_x шляхом зниження температури згоряння [12]. Теплотворна здатність пропану висока, але його стійкість до детонації низька. Для надійного запалювання можна використовувати іскрове запалювання, оскільки цетанове число для пропану-

бутану відносно низьке [13]. Використання пропану-бутану з методами прямого впорскування мотивується адаптацією безпосереднього впорскування та перевагами інтеграції з іскровим запалюванням з точки зору продуктивності в циліндрі. Через ці обставини необхідно застосувати таку техніку згоряння, щоб досягти високої продуктивності та низького рівня забруднюючих речовин у переобладнаному з дизеля газовому двигуні, що працює на пропані-бутані.

Переобладнання бензинового або дизельного транспортного засобу для роботи на зрідженому нафтовому газі (ЗНГ) часто є більш доступним, ніж переведення його на стиснений ПГ (СПГ). Комплекти для переобладнання транспортних засобів, що працюють на ЗНГ, як правило, дешевші через простішу технологію та процеси встановлення. ЗНГ дешевший, ніж бензин, дизельне паливо і ПГ. Вартість ЗНГ за літр зазвичай нижча, ніж СПГ за метр кубічний, що робить його економічно вигідним.

ЗНГ має вищу густину енергії порівняно з СПГ. Це означає, що при тому самому обсязі ЗНГ містить більше енергії, забезпечуючи кращу паливну ефективність. Транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, можуть проїжджати більші відстані порівняно з транспортними засобами на СПГ з тією ж ємністю балонів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження показників переобладнаного з дизеля газового двигуна з іскровим запалюванням.

Для досягнення мети в роботі вирішуються наступні **завдання**:

- оцінка роботоздатності переобладнаного з дизеля газового двигуна при його роботі на пропано-бутановій суміші;

- визначення енергетичних, паливо-економічних та екологічних показників газового двигуна.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Фізико-хімічні властивості газових палив наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники моторних палив

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	-

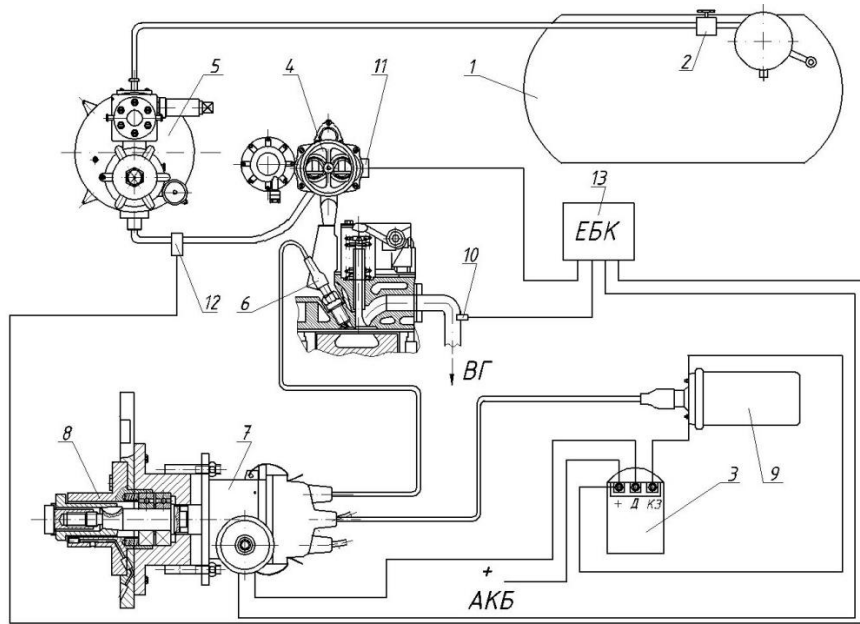
З таблиці 1 видно, що основні показники пропан-бутану є прийнятними для його використання в якості моторного палива в переобладнаних з дизелів газових двигунах з іскровим запалюванням. Але октанове число пропано-бутанових сумішей менше, ніж СПГ.

В умовах лабораторії двигунів внутрішнього згоряння ЛНТУ здійснено переобладнання дизеля Д-243, встановленого на випробувальному стенді, в газовий двигун з іскровим запалюванням [14] за схемою, зображеною на рис. 1. Було демонтовано дизельну паливну апаратуру і замість неї встановлено електронну безконтактну систему запалювання. Замість форсунок встановлені свічки запалювання, замість паливного насоса високого тиску встановлений переривач-розподільник. Встановлена газова паливна апаратура: газовий редуктор та газоповітряний змішувач. Змішувач встановлений на заново виготовленому впускному колекторі. Ступінь стиску двигуна було зменшено з 16 до 11 одиниць відповідно до октанового числа пропан-бутану. Виконано регулювання двигуна, зокрема встановлений оптимальний кут випередження запалювання та відрегульований склад газоповітряної суміші.

В результаті стендових випробувань отримані навантажувальні характеристики двигуна з заміром токсичності відпрацьованих газів (рис. 2).

Аналіз кривих характеристики показує, що вміст оксиду вуглецю CO у відпрацьованих газах газового двигуна на режимах малих та середніх навантажень практично такий же, як у дизеля. На режимах великих навантажень (при потужності двигуна більше 25 кВт) вміст CO незначно більший у газового двигуна (до 0,5 %). Концентрація вуглеводнів у відпрацьованих газах газового двигуна на режимах малих і середніх навантажень до 180 млн⁻¹ більша у порівнянні з дизелем. На режимах

великих навантажень вміст вуглеводнів менший. У відпрацьованих газах газового двигуна відсутня сажа, в дизеля її вміст досить значний.



1 - балон; 2 - магістральний вентиль; 3 - комутатор; 4 - газоповітряний змішувач; 5 - газовий редуктор; 6 - свічка запалювання; 7 - переривач-розподільник; 8 - привід переривача-розподільника; 9 - котушка запалювання; 10 - датчик вільного кисню; 11 - датчик положення дросельної заслінки; 12 - кроковий дозатор; 13 - електронний блок керування

Рисунок 1 – Об’єднана схема систем запалювання і живлення газового двигуна

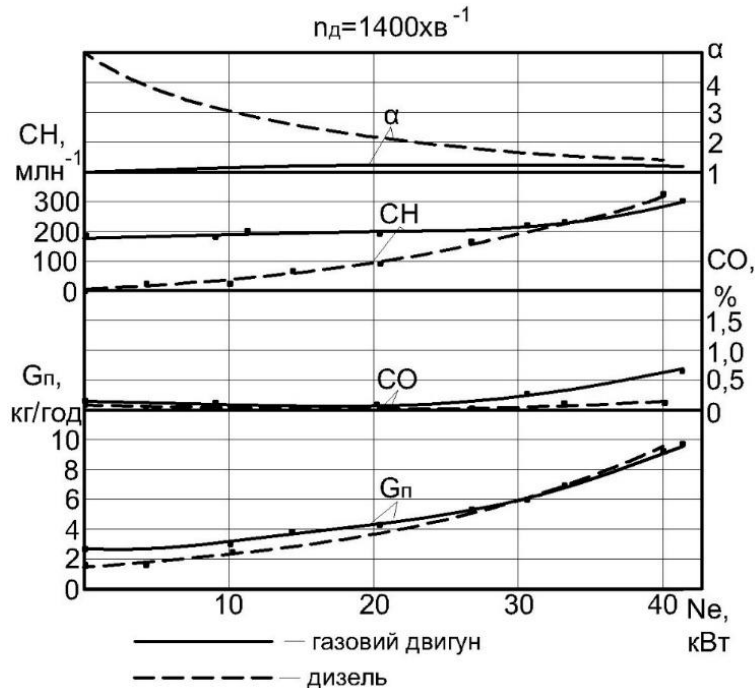


Рисунок 2 – Навантажувальна характеристика двигуна з заміром викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами

Потужність газового двигуна при 1400 хв^{-1} збільшилась з 40 кВт до 41,5 кВт, що можна пояснити хорошими енергетичними показниками пропан-бутану. Годинна витрата палива газового двигуна на режимах малих і середніх навантажень більша в межах 1 кг/год, що можна пояснити роботою двигуна на більш багатих сумішах. На режимах великих навантажень витрата газу практично рівна витраті дизельного палива.

Зовнішня швидкісна характеристика газового двигуна підтвердила його хороші енергетичні показники (рис. 3).

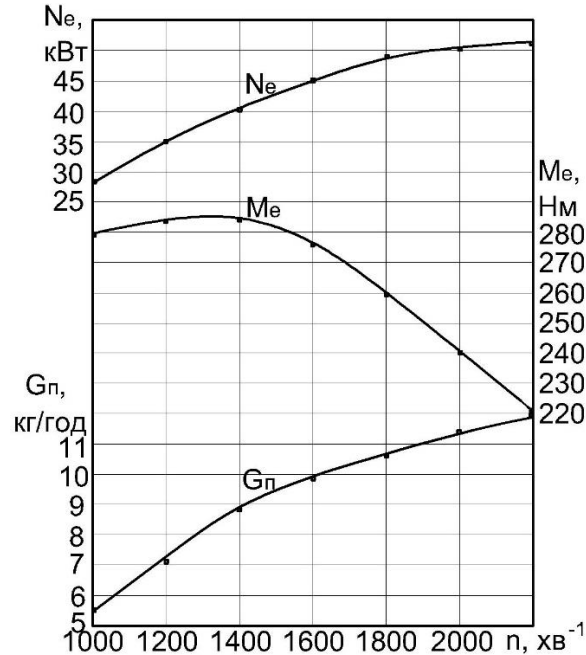


Рисунок 3 – Зовнішня швидкісна характеристика газового двигуна Д-243Г

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, як правило, споживають менше палива, ніж їх аналоги на СПГ, щоб подолати ту саму відстань. Оскільки ЗНГ зберігається в рідкому вигляді, він забезпечує більш послідовний і ефективний процес згоряння порівняно з СПГ, який знаходиться в газоподібному стані.

ЗНГ зберігається у вигляді рідини під помірним тиском, що означає, що резервуари для зберігання можуть бути меншими та компактнішими, ніж резервуари для СПГ. Це дозволяє краще керувати простором в автомобілі, звільняючи більше місця для вантажу або пасажирів.

Вища густина енергії ЗНГ в поєднанні з його рідкою формою дозволяє транспортним засобам, що працюють на газовому паливі, долати більшу відстань перед заправкою порівняно з транспортними засобами, що працюють на СПГ. Це робить ЗНГ ідеальним варіантом для подорожей на далекі відстані, особливо в районах з обмеженою кількістю заправних станцій.

ЗНГ згоряє більш рівномірно, ніж СПГ. Це забезпечує більш плавну роботу двигуна, зменшуючи спрацювання компонентів двигуна. Двигуни на ЗНГ, як правило, працюють тихіше та з меншою вібрацією порівняно з двигунами на СПГ.

Транспортні засоби, що працюють на ЗНГ, зазвичай відчувають менші втрати потужності порівняно з тими, що працюють на СПГ. Це особливо помітно у більш важких транспортних засобах або тих, що їздять у горбистих або гірських регіонах, де вихідна потужність є критичною для продуктивності.

Потребують окремих досліджень питання забезпечення надійного запуску газового двигуна в холодну пору та роботи в режимі холостого ходу, а також обмеження максимальної частоти обертання.

ВИСНОВКИ

Для проведення експериментальних досліджень проведено переобладнання дизеля Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням для роботи на пропан-бутані шляхом зменшення ступеня стискування до $\varepsilon = 11$ і встановлення елементів систем запалювання і живлення ЗНГ.

Результати експериментальних досліджень показали, що переобладнаний з дизеля газовий двигун є роботоздатним у всьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів. Його ефективна потужність близька до потужності базового дизеля, годинна витрата палива більша, ніж у дизеля в межах 1 кг/год.

Викиди окремих шкідливих речовин на деяких режимах роботи газового двигуна є більшими, ніж у дизеля, але сумарна токсичність відпрацьованих газів менша через відсутність в них сажі.

Аналіз отриманих результатів говорить про доцільність конвертації дизельних двигунів в газові. Високі енергетичні показники в газових двигунах, конвертованих з дизелів, отримуються

завдяки можливості реалізації великих значень ступені стиску. При переході на газ затрати на паливо-мастильні матеріали зменшуються майже у два рази. Термін окупності інвестицій на конвертацію складає від 9 до 16 місяців.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. U.S. Energy Information Administration. Short-Term Energy Outlook. URL: https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php (дата звернення: 27.04.2023).
2. Fayyazbakhsh A., Bell M. L., Zhu X., Mei X., Koutný M., Hajinajaf N. та ін. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 376. Article 134260. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.134260.
3. Islam Rony Z., Mofijur M., Hasan M. M., Rasul M. G., Jahirul M. I., Forruque Ahmed S. та ін. Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals. *Fuel*. 2023. Vol. 338. Article 127220. DOI: 10.1016/J.FUEL.2022.127220.
4. Arslan E., Kahraman N. Comparison of natural gas and propane addition to combustion air in terms of engine performance in compression ignition engine. *Fuel*. 2022. Vol. 312. Article 122952. DOI: 10.1016/J.FUEL.2021.122952.
5. Lindstad E., Lagemann B., Riialand A., Gamlem G. M., Valland A. Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021. Vol. 101. Article 103075. DOI: 10.1016/J.TRD.2021.103075.
6. Yeo S. J., Kim J., Lee W. J. Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 330. Article 129955. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129955.
7. Gore K., Rigot-Müller P., Coughlan J. Cost assessment of alternative fuels for maritime transportation in Ireland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 110. Article 103416. DOI: 10.1016/J.TRD.2022.103416.
8. Livaniou S., Papadopoulos G. A. Liquefied Natural Gas (LNG) as a transitional choice replacing marine conventional fuels (heavy fuel oil/marine diesel oil), towards the era of decarbonisation. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article 16364. DOI: 10.3390/SU142416364.
9. Baek S., Lee S., Shin M., Lee J., Lee K. Analysis of combustion and exhaust characteristics according to changes in the propane content of LPG. *Energy*. 2022. Vol. 239. Article 122297. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.122297.
10. Simsek S., Uslu S., Simsek H., Uslu G. Improving the combustion process by determining the optimum percentage of liquefied petroleum gas (LPG) via response surface methodology (RSM) in a spark ignition engine running on gasoline-LPG blends. *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 221. Article 106947. DOI: 10.1016/J.FUPROC.2021.106947.
11. Aydin M., Irgin A., Çelik M. B. The impact of diesel/LPG dual fuel on performance and emissions in a single cylinder diesel generator. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018. Vol. 8. No. 5. P. 1–14. DOI: 10.3390/app8050825.
12. Lee J., Choi S., Kim G., Kim D., Lee S., Lee S. та ін. A study of emissions reduction through dual-fuel combustion with propane in a compression ignition engine. *SAE Technical Papers*. 2013. DOI: 10.4271/2013-01-2669.
13. Kapusta Ł. J., Bachanek J., Jiang C., Piaszyk J., Xu H., Wyszynski M. L. Liquid propane injection in flash-boiling conditions. *Energies*. 2021. Vol. 14. Article 6257. DOI: 10.3390/EN14196257.
14. Захарчук В. І., Захарчук О. В., Швабюк В. В., Ярошук В. В. Переобладнання дизеля для роботи на пропан-бутані. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. – 2025. № 1 (24). С. 209–215.

REFERENCES

1. U.S. Energy Information Administration. (n.d.). Short-term energy outlook. Retrieved April 27, 2023, from https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php
2. Fayyazbakhsh, A., Bell, M. L., Zhu, X., Mei, X., Koutný, M., Hajinajaf, N., et al. (2022). Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*, 376, 134260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134260>
3. Islam Rony, Z., Mofijur, M., Hasan, M. M., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., Forruque Ahmed, S., et al. (2023). Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals. *Fuel*, 338, 127220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127220>

4. Arslan, E., & Kahraman, N. (2022). Comparison of natural gas and propane addition to combustion air in terms of engine performance in compression ignition engine. *Fuel*, 312, 122952. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122952>
5. Lindstad, E., Lagemann, B., Rialland, A., Gamlem, G. M., & Valland, A. (2021). Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of e-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>
6. Yeo, S. J., Kim, J., & Lee, W. J. (2022). Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129955>
7. Gore, K., Rigot-Müller, P., & Coughlan, J. (2022). Cost assessment of alternative fuels for maritime transportation in Ireland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 110, 103416. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103416>
8. Livaniou, S., & Papadopoulos, G. A. (2022). Liquefied natural gas (LNG) as a transitional choice replacing marine conventional fuels (heavy fuel oil/marine diesel oil), towards the era of decarbonisation. *Sustainability*, 14, 16364. <https://doi.org/10.3390/su142416364>
9. Baek, S., Lee, S., Shin, M., Lee, J., & Lee, K. (2022). Analysis of combustion and exhaust characteristics according to changes in the propane content of LPG. *Energy*, 239, 122297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122297>
10. Simsek, S., Uslu, S., Simsek, H., & Uslu, G. (2021). Improving the combustion process by determining the optimum percentage of liquefied petroleum gas (LPG) via response surface methodology (RSM) in a spark ignition engine running on gasoline–LPG blends. *Fuel Processing Technology*, 221, 106947. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106947>
11. Aydin, M., Irgin, A., & Çelik, M. B. (2018). The impact of diesel/LPG dual fuel on performance and emissions in a single cylinder diesel generator. *Applied Sciences*, 8(5), 825. <https://doi.org/10.3390/app8050825>
12. Lee, J., Choi, S., Kim, G., Kim, D., Lee, S., Lee, S., et al. (2013). A study of emissions reduction through dual-fuel combustion with propane in a compression ignition engine. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2669>
13. Kapusta, Ł. J., Bachanek, J., Jiang, C., Piaszyk, J., Xu, H., & Wyszynski, M. L. (2021). Liquid propane injection in flash-boiling conditions. *Energies*, 14, 6257. <https://doi.org/10.3390/en14196257>
14. Zakharchuk, V.I., Zakharchuk, O.V., Shvabiuk, V.V., & Yaroshchuk, V.V. (2025). Pereobladnannia dyzelia dlia roboty na propan–butani. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, 1(24), 209–215.

V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, M. Skalyga, A. Tsypiashchuk. Research of a Diesel-to-Gas Converted Engine Operating on Propane–Butane

Gas engines represent a promising direction in the development of modern transport due to the combination of high environmental performance and economic feasibility of their use. Gaseous fuels provide more complete and uniform combustion, which contributes to the reduction of harmful emissions, improvement of engine performance characteristics, decrease in operating costs, and extension of the service life of power units. Propane–butane has a number of advantages over natural gas when used in automotive applications. An analysis of its physicochemical properties indicates high values of the calorific value both of the fuel itself and of the fuel–air mixture, while its octane number is only slightly lower than that of natural gas. The D-243 diesel engine was converted into a spark-ignition gas engine designed to operate on propane–butane using the same technology as for natural gas conversion. However, the compression ratio was reduced to 11. Bench tests of the converted gas engine confirmed its operability. The power output of the gas engine remains at the level of the base diesel engine, while the hourly fuel consumption is slightly higher due to operation with richer air–fuel mixtures. Emissions of carbon monoxide and hydrocarbons are somewhat higher; however, soot is absent in the exhaust gases. Therefore, the overall toxicity of the exhaust gases of the gas engine is lower compared to that of the diesel engine. When switching to gaseous fuel, the costs of fuel and lubricants are reduced by nearly two times. The payback period for the conversion ranges from 9 to 16 months. Under these conditions, it is more advisable to convert automotive and agricultural machinery to operate on propane–butane, as its cost is lower compared to natural gas, the conversion expenses are also lower, and there is no reduction in the vehicle’s payload capacity.

Keywords: diesel engine, gas engine, conversion, propane–butane, gaseous fuel, fuel consumption, environmental performance.

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>

СКАЛИГА Микола Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: cnn110162@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1852-078X>

ЦИПЯШУК Андрій Лукич, аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький національний технічний університет, e-mail: andriy.cypa@gmail.com

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>.

Mykola SKALIGA, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: cnn110162@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1852-078X>

Andrii TSYPYASHCHUK, postgraduate of Motor Cars and Transport Technologies, Lutsk National Technical University, e-mail: andriy.cypa@gmail.com

Дата надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

<https://doi.org/10.36910/debvys76>