

Мельник В.М., Козак Ф.В.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу***ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОГАЗОВОГО ПАЛИВА З ТОВАРНИМ БЕНЗИНОМ В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ГБО 7-ГО ПОКОЛІННЯ**

Авторами виконано дослідження економічної ефективності використання біогазового пального у суміші із товарним бензином. У процесі використання природного газу на двигунах внутрішнього згоряння виникає ряд труднощів, що пов'язані з адаптацією двигуна та його систем. Проте, перспектива використання біогазового палива має істотну економічну та екологічну доцільність, а тому є надзвичайно важливою. До недавнього часу, забезпечити подачу одночасно рідкої і газоподібної фази палива було надзвичайно складно, проте газобалонне обладнання (ГБО) 7-го покоління для двигунів з прямим упорскуванням забезпечує подачу палива одночасно в рідкій фазі (через бензинові форсунки) та паровій фазі (у впускний колектор). А, отже дослідження економічної ефективності використання біогазового палива з товарним бензином в системі живлення ГБО 7-го покоління є досить актуальним. На початковому етапі нами отримано коефіцієнт, який враховує збільшення витрати паливної суміші через меншу теплотворну здатність біогазу. Із зростання частки біогазу в паливі від 10 до 50 % коефіцієнт витрати палива зростає від 1,05 до 1,31. Нами також отримано залежності зміни ціни використаного товарного бензину у паливних сумішах в залежності від процентного вмісту в них біогазового пального. Для прийнятих цін на товарний бензин та біогаз з проведених досліджень випливає, що із збільшенням процентного вмісту біогазу в еквівалентному паливі до 50 % досягається зростання економічної ефективності його застосування завдяки використанню низькооктанового газу і в результаті вартість отриманого палива знижується від 5,8 % до 30 %. Отже, використання біогазу на двигунах внутрішнього згоряння є перспективним як з огляду на зниження ціни використовуваного в паливних сумішах бензину так і з розвитком технологій ГБО.

Ключові слова: відновлювані джерела, біогаз, паливо, економія, ефективність, використання, газобалонне обладнання

ВСТУП

Використання природного газу у сумішах з товарним бензином на двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) викликає ряд труднощів, що пов'язані з адаптацією двигуна та його систем. Проте, сучасна система живлення ГБО 7-го покоління, що забезпечує подачу одночасно рідкої і газоподібної фази палива для двигунів з прямим упорскуванням і частково вирішує ці проблеми.

Перспектива використання біогазового палива має також істотну економічну та екологічну доцільність, а тому є надзвичайно важливою і може значно розширити сировинну базу для отримання палива та значно покращити екологічні показники ДВЗ.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ) використовуються в різних областях для різних цілей. ДВЗ в основному працюють на вуглеводневих паливах.

Використання викопного палива як джерела енергії негативно впливає на навколишнє середовище [1].

Щоб зменшити використання викопного палива ДВЗ переводять на альтернативні види палива, такі як біогаз і біопаливо.

Біогаз є одним із найперспективніших палив для ДВЗ. Біогаз виробляється шляхом розщеплення органічних речовин за відсутності кисню, і цей біогаз, є відновлюваним джерелом енергії [2].

Хімічний склад сирого біогазу такий: метан (CH_4) становить 50-75 % суміші, вуглекислий газ коливається від 25 до 50 % (CO_2), водяна пара в діапазоні 5-6 % і азот в діапазоні 12-15 % [3].

Біогаз має багато переваг порівняно як з викопним паливом, так і з іншими видами палива, отриманими з біомаси. Технологія біогазу відіграє значну роль у отримання енергії з органічних матеріалів і принесення відходів матеріалів у ґрунт, а після їх утворення – відходи не зникають, а перетворюються на набагато більш цінну органіку добриво [4, 5].

Крім того, він має такі переваги, як легкість транспортування в трубопроводах, безпечне зберігання у вигляді стисненого газу в балонах високого тиску, не розбавляючи мастило, і менше шкідливих викидів вихлопних газів для навколишнього середовища.

Біогаз також зменшує можливість детонації через його високу температуру самозаймання [6, 7].

Для ефективного спалювання біогазу, умови, які повинні бути реалізовані в циліндрі, принаймні 50% від CH_4 , який є основним складником біогазу [8].

Біогаз можна використовувати на ДВЗ без необхідності серйозних структурних змін [9, 10].

Крім того, якщо потрібні структурні зміни, то можна модифікувати двигун з іскровим запалюванням для роботи на біогазі [11, 12].

Управління двигуном може здійснюватися шляхом зміни роботи системи подачі палива та моменту запалювання ДВЗ.

Біогаз можна більш ефективно використовувати в ДВЗ шляхом очищення горючих газів, що містяться в них [13, 14].

Hotta та ін. [15] виконали дослідження ЗВШ двигуна, щоб дослідити зручність використання біогазу в двигуні SI. У порівнянні з роботою на бензині показники зросли на 12%. Автори вказали, що в той час як CO і NO_x зменшилися на 40% і 81,5%, HC і CO_2 зросли на 6,8% і 40%. Крім того, вони заявили, що тиск у циліндрі, отриманий з утилізація біогазу менший, ніж для бензину, положення пікового тиску в циліндрі знаходиться на нижчому рівні і з'являється значно пізніше.

Кречунас та ін. [16] перевірили біогазові суміші, що містять 0%, 20%, 40% і 50% CO_2 за об'ємом у двигуні SI за двох окремих моментів запалювання. Як йдеться в результатах дослідження, вказано, що збільшення концентрації CO_2 та використання фіксованого моменту запалювання зменшує тиск у циліндрі та NO_x .

Біогаз містить (CH_4), який змінюється в залежності від очищення та сировини для його отримання [17]. Різний вміст (CH_4) у біогазі впливає на встановлення стехіометричних умов для виробництва [18], використання біогазу з низькою теплотою згоряння призведе до низької продуктивності двигуна.

На сьогодні, біогаз є одним із альтернативних джерел енергії, яке є екологічно чистим та відновлюваним [19].

Наявність виробництва біогазу в сільській місцевості може безпосередньо сприяти створенню малих електростанцій які підтримують сільськогосподарську, птахівницьку та рослинницьку діяльність [20].

Були проведені дослідницькі роботи (і застосування) біогазу як палива для двигунів, наприклад, для силових двигунів або транспортних засобів [21]. Результати експерименту дозволяють заощадити бензин на 20%.

Тим часом дослідження біогазу як другого палива [22] призвели до 10% скорочення використання бензинового палива.

Кілька інших дослідників також досягли успіху у використанні біогазу як заміника палива [23], [24], [25]).

Використовуючи біогаз як паливо з мінімальним вмістом CH_4 45% може працювати двигун циклу Отто, електрогенератор потужністю до 100 кВт [26].

Стверджується, що використання викопного палива сприяють глобальному потеплінню через властиві викиди вуглекислого газу [27]. Тому вживаються необхідні заходи для диверсифікації енергії для різних цілей.

Дослідження щодо використання біогазу як палива для двигуна циклу Отто є частиною цих дослідницьких робіт.

Отже, як бачимо з огляду літературних джерел питання використання біогазу на транспортних засобах є актуальним та малодослідженим.

Тому, наші дослідження будуть напрямлені на використання біогазу як палива для ДВЗ в суміші з товарним бензином.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оскільки у сфері використання будь якого альтернативного виду палива суттєву роль відіграє економічна доцільність, то з огляду на викладене вище основною метою досліджень є обґрунтування економічної ефективності використання біогазового палива в суміші з товарним бензином у системі живлення ГБО 7-го покоління.

До основних задач дослідження відносяться:

- отримання коефіцієнта, що враховує збільшення витрати паливної суміші біогазового палива та товарного бензину;
- дослідження залежності ціни товарного бензину від його октанового числа;
- встановлення ефективності застосування еквівалентних палив на базі товарного бензину від вмісту в них біогазу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сучасна система ГБО сьомого покоління призначена для двигунів із прямим впорскуванням пального і може забезпечити подачу палива одночасно у двох станах: у рідкій фазі через бензинові форсунки безпосередньо в камеру згоряння та у паровій фазі – у впускний колектор двигуна. Саме ця особливість роботи системи ГБО сьомого покоління дає можливість одночасної подачі як рідкого палива (бензин) так і газоподібного палива (біогаз).

До одного з основних показників палива для бензинових двигунів, що суттєво впливає на його вартість відноситься октанове число (ОЧ).

Детонаційна стійкість бензинів оцінюється умовним показником – октановим числом, значення якого входить у марки бензину. Для його визначення вибирають еталонні палива, одне із яких володіє високою детонаційною стійкістю (має високу температуру займання). Це – ізооктан, і його октанове число умовно прийнято за 100. Друге еталонне паливо з низькою детонаційною стійкістю (має низьку температуру займання) – н-гептан і його октанове число умовно прийнято за 0.

На економічну ефективність застосування біогазу в ГБО сьомого покоління при його частковій подачі в ДВЗ з товарним бензином впливають фінансові витрати на паливо, тому, що інші витрати (на оливу, амортизаційні відрахування і т.д.), як під час роботи автомобіля на товарному бензині так і при комбінації бензину з біогазом, будуть практично однаковими.

Доцільність додавання біогазу до товарного бензину визначається за методикою [28], якщо:

$$Ц_{ТБ} \geq (Ц_{Б} \cdot q_{Б} + Ц_{БГ} \cdot q_{БГ}) \cdot k, \quad (1)$$

де $Ц_{ТБ}$ – роздрібна ціна товарного бензину, грн./л;

$Ц_{Б}$ – роздрібна ціна л бензину, що може використовуватися в паливних сумішах, грн./л;

$Ц_{БГ}$ – роздрібна ціна л біогазу, грн.;

$q_{Б}$ – об'ємна частка бензину в паливних сумішах, %;

$q_{БГ}$ – об'ємна частка біогазу в паливних сумішах, %;

k – коефіцієнт, який враховує збільшення витрати паливної суміші, і визначається з рівняння балансу теплоти, яка міститься в товарному бензині та паливних сумішах бензину і біогазу.

Нижчу теплоту згоряння паливних сумішей знаходимо за формулою:

$$h_{НПС} = h_{НБ} \cdot q_{Б} + h_{НБГ} \cdot q_{БГ}, \quad (2)$$

де $h_{НБГ}$ – нижча теплота згоряння біогазу палива, яка згідно досліджень складає $h_{НБГ} = 26,93$ МДж/м³;

$h_{НБ}$ – нижча теплота згоряння бензину, 44 МДж/кг або 33 МДж/л.

З урахуванням формули (2) отримуємо:

$$k = \frac{h_{НБ}}{h_{НБ} \cdot q_{Б} + h_{НБГ} \cdot q_{БГ}}. \quad (3)$$

Значення коефіцієнта k залежно від об'ємної частки біогазу в паливних сумішах наводимо в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта k в залежності від частки біогазу в паливних сумішах

$q_{БГ}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
k	1,11	1,25	1,43	1,67	2,0

Для розрахунку економічної ефективності застосування біогазу на двигуні ауді А6 побудуємо графічну залежність зміни ціни товарного бензину від ОЧ. Виходячи з роздрібних цін на бензин на час проведення розрахунків, вартість одного л в залежності від ОЧ становила при ОЧ не менше 92 – 56,99 грн./л, при ОЧ не менше 95 – 58,69 грн./л, а за ОЧ не менше 98 – 60,99 грн./л, що показано графічно на рис. 1.

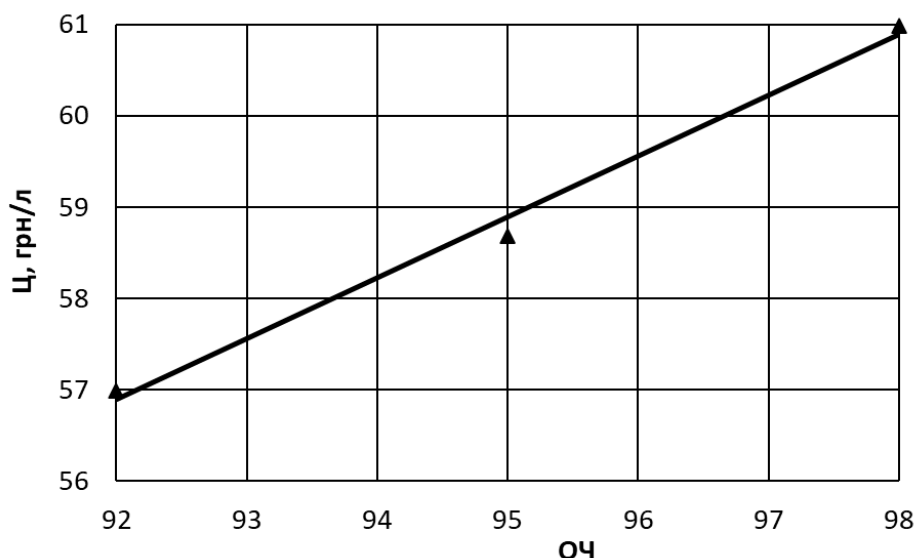


Рисунок 1 – Залежність зміни ціни товарного бензину в залежності від ОЧ

Зміну вартості бензину від ОЧ аналітично можна описати рівнянням:

$$Ц_{\text{БОЧ}} = 0,6667 \cdot \text{ОЧ}_B + 4,4433, \quad (4)$$

де ОЧ_B – октанове число товарного бензину. При цьому коефіцієнт кореляції даної залежності рівний $R^2=0,99$.

Значення ОЧ_B , необхідного для використання з біогазом розраховують за залежністю:

$$\text{ОЧ} = \text{ОЧ}_B - \Delta \text{ОЧ}, \quad (5)$$

де $\Delta \text{ОЧ}$ – приріст октанового числа суміші бензину і біогазу, що визначається за процентним масовим вмістом біогазу в паливних сумішах.

Економічна ефективність застосування паливних сумішей оцінюється різницею цін л товарного бензину і відповідної за тепловою згоряння кількості паливної суміші бензину і біогазу та визначається за залежністю:

$$\Delta E = Ц_B - (Ц_{\text{БОЧ}} \cdot Q_B + Ц_{\text{БГ}} \cdot Q_{\text{БГ}}) \cdot k. \quad (6)$$

В розрахунках прийнята вартість л біогазу – 0,00385 грн./л.

У розрахунку економічної ефективності застосування біогазу, в результаті добавки до товарних бензинів і спалювання на ДВЗ, необхідною умовою має бути забезпечення однакових ОЧ паливних сумішей у порівнянні з товарним бензином. За результатами дослідження, на рис. 2 показано графічну залежність зміни ОЧ бензину від процентного вмісту в ньому біогазу.

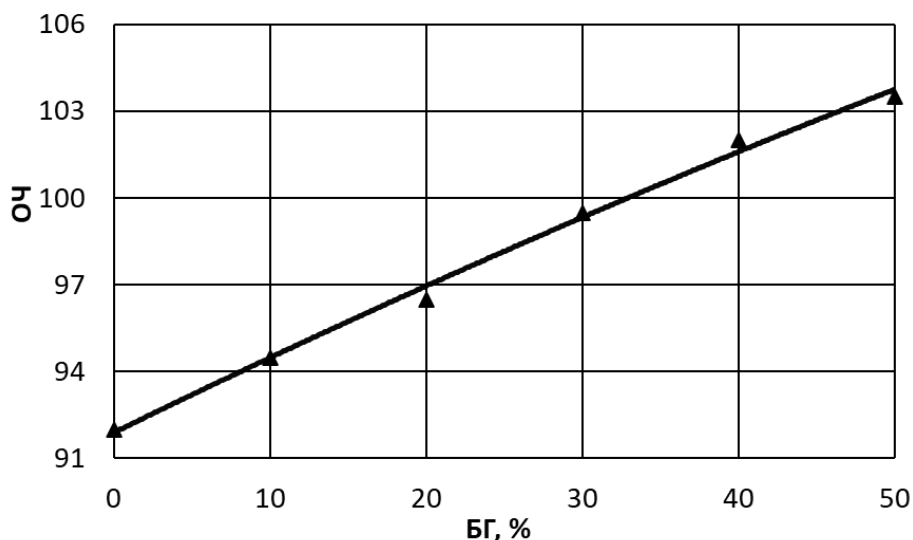


Рисунок 2 – Залежність зміни ОЧ товарного бензину від вмісту біогазу

Залежність рис. 2 описується аналітичним рівнянням (7).

$$\text{ОЧ} = -0,0005(\% \text{ БГ})^2 + 0,2639(\% \text{ БГ}) + 91,893. \quad (7)$$

Коефіцієнт кореляції приведенного рівняння рівний $R^2=0,99$.

Залежність приросту $\Delta\text{ОЧ}$ бензину (визначеного з рис. 2) від процентного вмісту в ньому біогазу зображена на рис. 3.

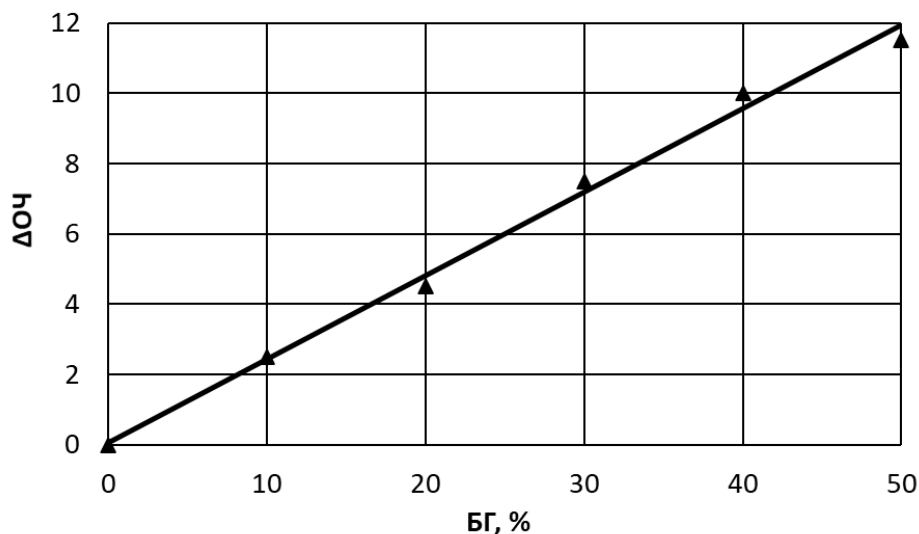


Рисунок 3 – Графік залежності приросту ОЧ паливних сумішей від вмісту в них біогазу

Аналітично залежність рис. 3 описується поліномом наступного виду:

$$\Delta\text{ОЧ} = 0,2371(\% \text{ БГ}) + 0,0714. \quad (8)$$

Коефіцієнт кореляції приведенного рівняння рівний $R^2=0,99$.

Як видно з рис. 1, із зменшенням ОЧ бензину роздрібна ціна його зменшується, для досягнення економічної ефективності використання паливних сумішей бензину і біогазу, спочатку з рівняння (8) визначають зміну $\Delta\text{ОЧ}$ в залежності від вмісту біогазу в паливних сумішах, а далі з рівняння (7) – октанове число бензину, що доцільно використовувати в паливних сумішах.

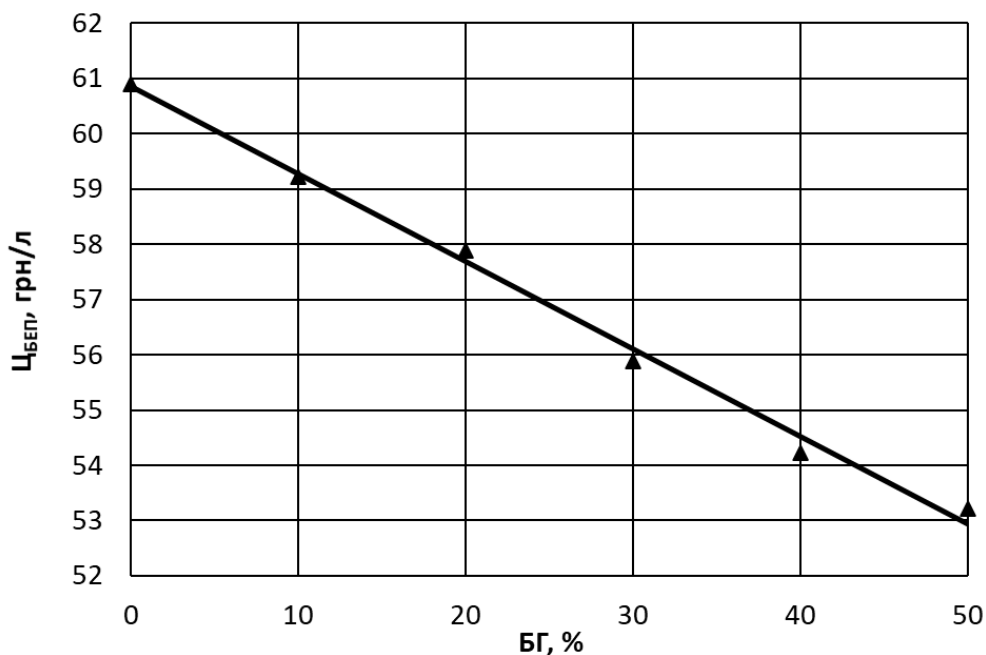


Рисунок 4 – Залежність зміни ціни бензину використаного в паливних сумішах від вмісту в них біогазу

Отже з рівняння (4) – одержуємо ціну бензину, що використовується в паливних сумішах. Залежності (рис. 4) описується відповідно наступним аналітичним рівнянням:

$$Ц_{БЕП} = -0,1581(\% \text{ БГ}) + 60,846. \quad (9)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння (9) рівний $R^2=0,99$.

Для оцінки економічної ефективності використання паливних сумішей бензину і біогазу, були розраховані залежності зміни ціни використаного бензину згідно методики [28] в залежності від вмісту біогазу (рис. 5).

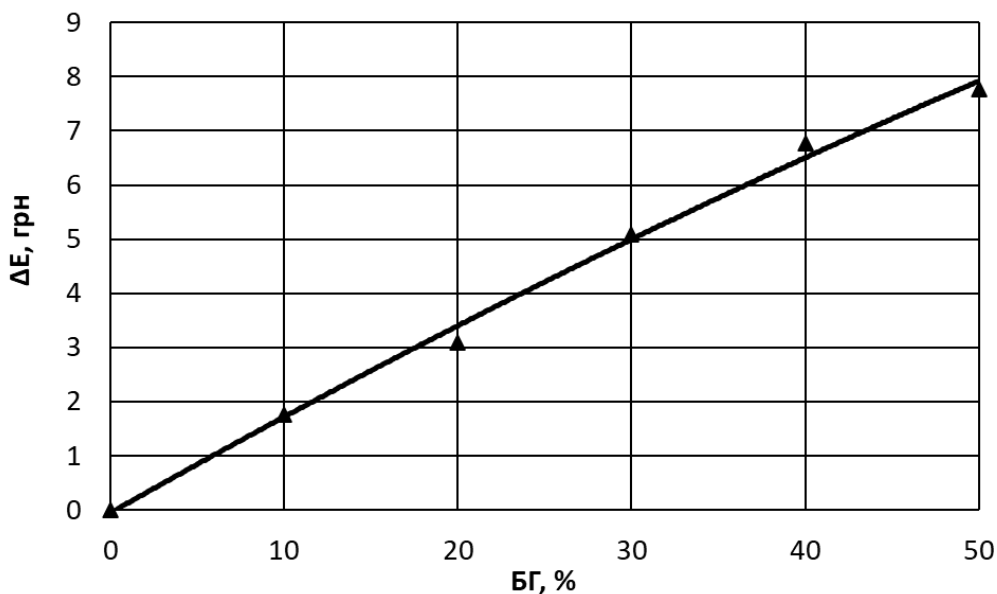


Рисунок 5 – Залежність ефективності застосування еквівалентних палив на базі товарного бензину від вмісту в них біогазу

Застосування різних паливних сумішей забезпечується додавкою до бензину різної кількості біогазу, а тому економічна ефективність застосування різних паливних сумішей буде різною. При

кожній добавці біогазу до палива було проведено розрахунок економічної ефективності, за даними розрахунку побудовано графічні залежності її зміни від процентного вмісту в паливних сумішах біогазу (рис. 5).

Одержана графічна залежність економічної ефективності використання біогазу в еквівалентному паливі описуються наступним рівнянням:

$$\Delta E = -0,0004(\%БГ)^2 + 0,1817(\%БГ) - 0,0541 \quad (10)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння (10) рівний $R^2=0,99$.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз економічної ефективності показав, що використання біогазового палива в системах ГБО 7-го покоління дозволяє знизити собівартість експлуатації автомобіля на 13,5 %. Це зумовлено нижчою ринковою вартістю біогазу порівняно з нафтовим паливом, його високим октановим числом та високою точністю дозування паливної суміші, що характерно для систем 7-го покоління.

Попри високу початкову вартість ГБО 7-го покоління дозволяє уникнути втрат потужності (на відміну від ГБО 4), відсутність необхідності в окремому випарнику знижує витрати на обслуговування, а високе октанове число біогазу оптимізує роботу двигуна на суміші з бензином.

Додаткова економічна вигода формується за рахунок екологічної складової – використання біогазу мінімізує викиди CO_2 , що в умовах впровадження вуглецевого податку робить підприємство більш рентабельним.

Однак масовому впровадженню технології використання добавок біогазу до товарного бензину може завадити ряд факторів:

- недостатня мережа біогазових заправок;
- нестабільність хімічного складу біогазу (необхідність очищення до стану біометану);
- високі вимоги до якості товарного бензину, що використовується як допоміжне паливо.

ВИСНОВКИ

Отже, для прийнятих цін на бензин і біогаз та виходячи з проведених розрахунків впливає, що із збільшенням вмісту біогазу в системі живлення бензином і біогазом досягається збільшення економічної ефективності їх застосування за рахунок використання бензину з низьким ОЧ.

При застосуванні біогазу разом з бензином, що має низьке ОЧ в кількості до 50% можна досягнути зниження вартості бензину на кожному л до 7,5 грн.

Такий ефект, при використанні біогазу разом із бензинами вказує на перспективність даного напрямку використання біогазового пального та доцільність подальшого дослідження даного напрямку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1.J. Gelegenis et al. Optimization of biogas production by codigesting whey with diluted poultry manure, *Renewable Energy*, (2007), P. 35-38.

2.V. Katinas et al. Analysis of biodegradable waste use for energy generation in Lithuania *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2019), P. 121-135/

3.P.K. Nutakki et al. Mulugundam Sivasurya. "Effect Of n-Amyl Alco-hol/Biodiesel Blended Nano Additives on the Performance, Combustion and Emis-sion Characteristics of CRDI Diesel Engine", *Research Square*, (2021), P. 45-54.

4.Diamantis V., Eftaxias A., Stamatelatu K., Noutsopoulos C., Vlachokostas C., Aivasidis A. (2021) Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes, *Renew. Energy* 168, 438–447.

5.Tallou A., Salcedo F.P., Haouas A., Jamali M.Y., Atif K., Aziz F., Amir S. (2020) Assessment of biogas and biofertilizer produced from anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with municipal wastewater and cow dung, *Environ. Technol. Innov.* 20, 101152.

6.Tippayawong N., Thanompongchart P. (2010) Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO_2 and H_2S in a packed column reactor, *Energy* 35, 12, 4531–4535.

7.Porpatham E., Ramesh A., Nagalingam B. (2013) Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine, *Energy Conv. Manage.* 76, 463–471.

8.Simsek S., Uslu S. (2020) Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine, *Fuel* 279, 118528.

9. Jung C., Park J., Song S. (2015) Performance and NO_x emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine, *Energy* 86, 186–195.
10. Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K., Kulkarni V. (2020) Ignition timing and compression ratio as effective means for the improvement in the operating characteristics of a biogas fueled spark ignition engine, *Renew. Energy* 150, 854–867.
11. Kalsi S.S., Subramanian K.A. (2017) Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine, *Renew. Energy* 106, 78–90.
12. Nadaleti W.C., Przybyla G. (2018) Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in southern Brazilian rice industries, *Energy* 154, 38–51.
13. Verma S., Das L.M., Kaushik S.C. (2017) Effects of varying composition of biogas on performance and emission characteristics of compression ignition engine using exergy analysis, *Energy Conv. Manage.* 138, 346–359.
14. Sadiq R., Iyer R.C. (2020) Experimental investigations on the influence of compression ratio and piston crown geometry on the performance of biogas fuelled small spark ignition engine, *Renew. Energy* 146, 997–1009.
15. Feroskhan M., Ismail S. (2017) A review on the purification and use of biogas in compression ignition engines, *Int. J. Autom. Mech. Eng.* 14, 3, 4383–4400.
16. Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K. (2019) Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas, *Renew. Energy* 134, 1307–1319.
17. Asmaranto R, Widhiyanuriyawan D and Sugiharto 2015 Pengembangan Teknologi Biogas Pedesaan untuk mengurangi Kerusakan Hutan dan Pencemaran Sumber Air (Malang: Universitas Brawijaya).
18. Mitzlaff KV 1988 Engines for biogas Theory, Modification, Economic Op-eration (Africa: A publ. of Dt. Zentrum für Entwicklungstechnologien-Gate in: Dt. Ges. für Techn. Zusammenarbeit Gtz GmbH).
19. Venkata Ramesh Mamilla, Gopinath V, Subba Rao CV and Rao Lakshmi Narayana G 2011, Performance And Emission Characteristics of 4 Stroke Petrol En-gine Fueled With Biogas/LPG Blends *Int. J. of Adv. Eng. Technol.* vol 2 (1) pp 209-213.
20. Ehsan MD and Naznin N 2005 Performance of a Biogas Run Petrol Engine for Small Scale Power Generation *J. of Energi & Environment* vol 4 pp 1-9
21. Bui Van Ga 2002 LPG Fueling System for Automobiles Daihatsu 1.6 to Match Urban Transport Conditions in Vietnam *Int. Conf. Automotive Technol.* (Ha-noi: VSAE-ICAT).
22. Albela H Pundkar, S M Lawankar and Sameer Deshmukh 2012 Perfor-mance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review *Int. J. of Sci. & Eng. Research* vol 3 (3), pp 1-7.
23. Kumar Mohan and Azad 2014 An Experimental Investigation of Perfor-mance and Emissions of LPG as Dual Fuel in Diesel Engine Generator *Int. J. of Eng. Research and Appl.* vol 4 (11), pp 41-53.
24. Rosli Abu Bakar 2002 Design and Development of a New CNG (Com-pressed Natural Gas) Engine, (Malaysia: Pusat Pengurusan Penyelidikan Universiti Teknologi).
25. Awogbemi, Omojola, Adeyemo and S Babatunde 2015 Development And Testing Of BiogasPetrol Blend as an Alternative Fuel For Spark Ignition Engine *Int. J. of Sci. & Technol. Research* vol 4 (9) pp 179-185.
26. Theodorita AS, Dominik R, Heinz P, Tobias F, Silke V and Rainer J 2008 Biogas Handbook, (Denmark: University of Southern Denmark BiG East Project Es-bjerg).
27. Sara MC A, Jyh Y Chen and Fernand A Carlos 2011 Mechanical of Com-bustion Processes (DOI: 10.1007/978-1-4419-7943-8).
28. Гутаревич Ю.Ф., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мороз О.Г. Оцінка ефективності додавання спиртових сполук до бензину. Автошляхових України. - 2004. - № 3. - С. 17-19.

REFERENCES

1. J. Gelegenis et al. Optimization of biogas production by codigesting whey with diluted poultry manure, *Renewable Energy*, (2007), P. 35-38.
2. V. Katinas et al. Analysis of biodegradable waste use for energy generation in Lithuania *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2019), P. 121-135/

- 3.P.K. Nutakki et al. Mulugundam Sivasurya. "Effect Of n-Amyl Alco-hol/Biodiesel Blended Nano Additives on the Performance, Combustion and Emis-sion Characteristics of CRDI Diesel Engine", Research Square, (2021), P. 45-54.
- 4.Diamantis V., Eftaxias A., Stamatelatos K., Noutsopoulos C., Vlachokostas C., Aivasidis A. (2021) Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes, *Renew. Energy* 168, 438–447.
- 5.Tallou A., Salcedo F.P., Haouas A., Jamali M.Y., Atif K., Aziz F., Amir S. (2020) Assessment of biogas and biofertilizer produced from anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with municipal wastewater and cow dung, *Environ. Technol. Innov.* 20, 101152.
- 6.Tippayawong N., Thanompongchart P. (2010) Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor, *Energy* 35, 12, 4531–4535.
- 7.Porpatham E., Ramesh A., Nagalingam B. (2013) Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine, *Energy Conv. Manage.* 76, 463–471.
- 8.Simsek S., Uslu S. (2020) Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine, *Fuel* 279, 118528.
- 9.Jung C., Park J., Song S. (2015) Performance and NO_x emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine, *Energy* 86, 186–195.
- 10.Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K., Kulkarni V. (2020) Ignition timing and compression ratio as effective means for the improvement in the operating characteristics of a biogas fueled spark ignition engine, *Renew. Energy* 150, 854–867.
- 11.Kalsi S.S., Subramanian K.A. (2017) Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine, *Renew. Energy* 106, 78–90.
- 12.Nadaleti W.C., Przybyla G. (2018) Emissions and performance of a spark-ignition gas engine generator operating with hydrogen-rich syngas, methane and biogas blends for application in southern Brazilian rice industries, *Energy* 154, 38–51.
- 13.Verma S., Das L.M., Kaushik S.C. (2017) Effects of varying composition of biogas on performance and emission characteristics of compression ignition engine using exergy analysis, *Energy Conv. Manage.* 138, 346–359.
- 14.Sadiq R., Iyer R.C. (2020) Experimental investigations on the influence of compression ratio and piston crown geometry on the performance of biogas fuelled small spark ignition engine, *Renew. Energy* 146, 997–1009.
- 15.Feroskhan M., Ismail S. (2017) A review on the purification and use of biogas in compression ignition engines, *Int. J. Autom. Mech. Eng.* 14, 3, 4383–4400.
- 16.Hotta S.K., Sahoo N., Mohanty K. (2019) Comparative assessment of a spark ignition engine fueled with gasoline and raw biogas, *Renew. Energy* 134, 1307–1319.
- 17.Asmaranto R, Widhiyanuriyawan D and Sugiharto 2015 Pengembangan Teknologi Biogas Pedesaan untuk mengurangi Kerusakan Hutan dan Pencemaran Sumber Air (Malang: Universitas Brawijaya).
- 18.Mitzlaff KV 1988 Engines for biogas Theory, Modification, Economic Op-eration (Africa: A publ. of Dt. Zentrum für Entwicklungstechnologien-Gate in: Dt. Ges. für Techn. ZusammenarbeitGtz GmbH).
- 19.Venkata Ramesh Mamilla, Gopinath V, Subba Rao CV and Rao Lakshmi Narayana G 2011, Performance And Emission Characteristics of 4 Stroke Petrol En-gine Fueled With Biogas/LPG Blends *Int. J. of Adv. Eng. Technol.* vol 2 (1) pp 209-213.
- 20.Ehsan MD and Naznin N 2005 Performance of a Biogas Run Petrol Engine for Small Scale Power Generation *J. of Energi & Environment* vol 4 pp 1-9
- 21.Bui Van Ga 2002 LPG Fueling System for Automobiles Daihatsu 1.6 to Match Urban Transport Conditions in Vietnam *Int. Conf. Automotive Technol.* (Ha-noi: VSAE-ICAT).
- 22.Albela H Pundkar, S M Lawankar and Sameer Deshmukh 2012 Perfor-mance and Emissions of LPG Fueled Internal Combustion Engine: A Review *Int. J. of Sci. & Eng. Research* vol 3 (3), pp 1-7.
- 23.Kumar Mohan and Azad 2014 An Experimental Investigation of Perfor-mance and Emissions of LPG as Dual Fuel in Diesel Engine Generator *Int. J. of Eng. Research and Appl.* vol 4 (11), pp 41-53.
- 24.Rosli Abu Bakar 2002 Design and Development of a New CNG (Com-pressed Natural Gas) Engine, (Malaysia: Pusat Pengurusan Penyelidikan Universiti Teknologi).

25. Awogbemi, Omojola, Adeyemo and S Babatunde 2015 Development And Testing Of BiogasPetrol Blend as an Alternative Fuel For Spark Ignition Engine Int. J. of Sci. & Technol. Research vol 4 (9) pp 179-185.

26. Theodorita AS, Dominik R, Heinz P, Tobias F, Silke V and Rainer J 2008 Biogas Handbook, (Denmark: University of Southern Denmark BiG East Project Es-bjerg).

27. Sara MC A, Jyh Y Chen and Fernand A Carlos 2011 Mechanical of Com-bustion Processes (DOI: 10.1007/978-1-4419-7943-8).

28. Hutarevych Yu.F., Hovorun A.H., Korpach A.O., Moroz O.H. Otsinka efektyvnosti dodavannia spyrtovykh spoluk do benzynu. Avtoshliakhovykh Ukrainy. - 2004. - № 3. - S. 17-19.

V. Melnyk, F.Kozak. Research on the economic efficiency of using biogas fuel with commodity gasoline in the 7th generation hbo power supply system.

The authors have conducted a study of the economic efficiency of using biogas fuel in a mixture with commercial gasoline. In the process of using natural gas in internal combustion engines, a number of difficulties arise related to the adaptation of the engine and its systems. However, the prospect of using biogas fuel has significant economic and environmental feasibility, and therefore is extremely important. Until recently, it was extremely difficult to ensure the simultaneous supply of liquid and gaseous phases of fuel, but the 7th generation gas cylinder equipment (GCB) for direct injection engines provides fuel supply simultaneously in the liquid phase (through gasoline injectors) and the vapor phase (into the intake manifold). Therefore, the study of the economic efficiency of using biogas fuel with commercial gasoline in the 7th generation GCB power supply system is quite relevant. At the initial stage, we obtained a coefficient that takes into account the increase in fuel mixture consumption due to the lower calorific value of biogas. With an increase in the share of biogas in fuel from 10 to 50%, the fuel consumption coefficient increases from 1.05 to 1.31. We also obtained the dependence of the change in the price of used commercial gasoline in fuel mixtures depending on the percentage content of biogas fuel in them. For the adopted prices for commercial gasoline and biogas, the conducted studies show that with an increase in the percentage content of biogas in equivalent fuel to 50%, an increase in the economic efficiency of its use is achieved due to the use of low-octane gas and, as a result, the cost of the resulting fuel decreases from 5.8% to 30%. Therefore, the use of biogas in internal combustion engines is promising both in view of the reduction in the price of gasoline used in fuel mixtures and with the development of HBO technologies.

Keywords: renewable sources, biogas, fuel, economy, efficiency, use, gas cylinder equipment

МЕЛЬНИК Василь Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу e-mail: vasjamel@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>

КОЗАК Федір Васильович, кандидат технічних наук, професор кафедри автомобільного транспорту, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу e-mail: fkozak@nung.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0009-9396-9147>

MELNYK Vasyl, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

e-mail: vasjamel@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>

KOZAK Fedir. Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Road Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

e-mail: fkozak@nung.edu.ua. <https://orcid.org/0009-0009-9396-9147>

Дата надходження статті до видання: 01.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

<https://doi.org/10.36910/qx7gdh81>