

Гнип М.М.

*Івано-Франківській національній технічній університет нафти і газу***ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТУЖНІСНИХ ТА ПАЛИВНО-ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ, ЯКІ КОНВЕРТОВАНІ НА СУМІШЕВЕ ГАЗОВЕ ПАЛИВО**

Досліджено енергетичні цінності та показники дизельних двигунів, які конвертовані на альтернативне сумішеве газове паливо. Проведено теоретичні дослідження конвертації дизельних двигунів на газомоторні палива. Сформульовані методика та планування експериментальних досліджень використання альтернативного сумішевого палива в переобладнаних дизельних двигунах. Проводились стендові дослідження. Дизельний двигун було переобладнано для роботи на альтернативній газовій суміші. Для порівняльної оцінки показників двигуна на дизельному паливі з відповідними показниками конвертованого дизельного двигуна на суміші пропан-бутану з добавками на основі піролізного газу в кількості 5 та 10 % знімалися навантажувальні характеристики двигуна на фіксованих частотах обертання колінчастого валу. Перед вимірюваннями параметрів для стабільного протікання робочого процесу двигун на заданому режимі працював не менше 5 хвилин. Результати вимірювань заносились в протокол випробовувань при трикратному повторюванні на кожному режимі роботи двигуна.

Експериментально визначали залежність ефективної потужності  $N$  від частоти обертання колінчастого вала двигуна  $n$  з різним моторним паливом. Експериментальні дослідження показали, що максимальна ефективна потужність двигуна при використанні чистого пропан-бутану замість дизельного палива зросла з 17,1 до 18,1 кВт або на 5,2 %; максимальна ефективна потужність двигуна при використанні суміші 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу замість дизельного палива збільшилась з 17,1 до 17,5 кВт або на 2,3 %; максимальна ефективна потужність двигуна при використанні суміші 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу замість дизельного палива знизилась з 17,1 до 16,9 кВт або на 1,2 %.

**Ключові слова:** піроліз, теплотворна здатність, альтернативні палива, дизельний двигун, конвертація двигуна на газ.

**ВСТУП**

Запаси нафти в надрах Землі постійно зменшуються. За найоптимістичнішими прогнозами, при існуючих обсягах розвіданих запасів і обсягах видобутку нафти людству вистачить приблизно на 50 років [1]. Газомоторне паливо є другим енергоносієм після нафти. В даний час газ використовується як моторне паливо в більшості країн світу. У даний час газове паливо найбільш широко використовується в Аргентині та Бразилії. [2].

**АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Вивчення досвіду розробок вітчизняних і зарубіжних фахівців показує, що дизелі, переобладнані в газові двигуни, мають високі тягово-динамічні та паливно-економічні характеристики, а за екологічною безпекою навіть значно перевершують базові дизелі [3, 4]. Це свідчить про те, що для вирішення комплексної проблеми зниження рівня споживання рідких нафтових палив необхідно суттєво збільшити частку силових приводів з газовими двигунами, а для цього, поряд з іншими заходами, розробити технології перетворення існуючих дизельних електроприводів на газові двигуни слід розробляти для нафтогазової промисловості. При цьому дизельні електроприводи, переобладнані в газові двигуни, мають одночасно знизити витрати на паливно-мастильні матеріали та зменшити негативний вплив двигунів на навколишнє середовище [5].

Газ як моторне паливо для дизельних двигунів має цілий ряд переваг [6]:

менші витрати на газове паливо порівняно з дизельними паливами нафтового походження, оскільки газове паливо в середньому на 30-40% дешевше дизельного палива;

- відсутність нагару, що збільшує ресурс переобладнаних двигунів в 1,5-2,5 рази;
- частота заміни моторних масел і масляних фільтрів подвоюється;
- краще сумішоутворення, готується більш однорідна горюча суміш, вона рівномірніше розподіляється по циліндрах двигуна, плавніше зростає тиск згорання, що також подовжується ресурс переобладнаних двигунів;
- газовий двигун швидше прогрівається до робочої температури, тим самим знижується знос циліндро-поршневої групи і витрата палива кабріюлета;
- досягається більш повне згорання палива, отже, значно знижується токсичність вихлопних газів після конверсії;
- знижений шум двигуна.

Широке використання стиснутих та зріджених газових палив в дизельних двигунах технологічних установок нафтогазової галузі в нашій державі стримується внаслідок [7]:

- наявність серійного виробництва дизельних двигунів, що працюють на газі;
- зниження продуктивності робототехнічного обладнання при одній заправці газом поблизу лінії з нафтовими пожежами;
- висока пускова потужність газових двигунів взимку;
- переміщення масогабаритних параметрів обладнання при встановленому газопроводі;
- необхідність впливу на інфраструктуру транспортування та наповнення рухомих газів і газових балонів;
- негативні докази переважання дизельних двигунів для роботи у газодизельному режимі через їх низьку економічність та значну ціну за газодизельний агрегат.

Незважаючи на ці недоліки, у зв'язку з тенденцією постійного зростання вартості дизельного палива та впровадженням все більш суворих стандартів токсичності вихлопних газів, у майбутньому використання стисненого та зрідженого газу в дизельних двигунах у світі та у нас країна буде тільки розвиватися.

Про переваги переобладнання дизельних двигунів у газіві з іскровим запалюванням свідчить достатня кількість провідних світових фірм, які створили моногазові двигуни [8].

Відомі світові концерни такі, як MAN, Scania, Mercedes-Benz та інші вже розробили на базі дизельних двигунів газіві для автобусів та вантажних автомобілів [9].

На Ярославському моторному заводі досліджували газовий двигун, який був створений на базі дизельного двигуна ЯМЗ-236НЕ [11]. Двигун обладнували системою запалювання та газовою апаратурою з електронним управлінням, що мав максимальну питому витрату газу – 0,24 м<sup>3</sup>/кВт·год. Газовий двигун комплектувався штатним турбокомпресором та системою нейтралізації відпрацьованих газів. Конвертований двигун відповідав вимогам Правил ЕЕК ООН до рівня Євро-3 і зменшив викиди СО<sub>2</sub> на 30 % в порівнянні з базовим дизельним двигуном [12]. Система живлення з електронним управлінням автоматично забезпечувала склад газоповітряної суміші для забезпечення досягнення оптимальних показників паливної економічності.

В Україні теж є досвід переобладнання дизельних двигунів в газіві. Наприклад, в Інституті проблем машинобудування ім. А. Н. Подгорного НАНУ розроблено технологію переобладнання дизельних двигунів в газіві, створено зразок газового двигуна на базі дизельного Д-21 [15], що має номінальну потужність 18,4 кВт. Розроблена технологія передбачала максимальну орієнтацію на використання серійної газової апаратури і елементів систем запалення, мінімум змін в конструкції двигуна. Паливна економічність на режимі номінальної потужності погіршилась для конвертованого на газ двигуна на 11 % у порівнянні з базовим дизельним двигуном.

Фахівці з Інституту проблем машинобудування разом з працівниками Харківського національного автомобільно-дорожнього університету розробили технологію конвертації [22]. Особливістю розробки, є створення оригінальної системи запалення підвищеної енергії, яка повинна забезпечити двигуну хороші пускові характеристики в умовах мінусових температур. Переобладнання двигуна на газове паливо дозволило знизити викиди шкідливих речовин, в середньому, в 1,5-2 рази.

Потрібно відзначити, що переобладнання дизельних двигунів на метан або пропан-бутанову суміш не повністю відповідає вирішенню завдання переведення об'єктів та машин на відновлювальні та альтернативні джерела енергії [16]. Сьогодні в нашій країні є великі обсяги паливного потенціалу у вигляді низькокалорійних газів (піролізний, шахтний, доменний, коксовий, біогаз, гази звалищ). В

истовуються, а частково викидаються в атмосферу, забруднюють навколишнє середовище та не використовуються як моторні палива [17]. Одним із шляхів вирішення загальнодержавної проблеми переведення об'єктів та машин на відновлювальні джерела енергії є використання в якості альтернативних палив сумішей традиційних моторних та низькокалорійних газових палив в мобільних технологічних установках з двигунами внутрішнього згорання, зокрема це стосується і пересувних дизельних компресорних установках нафтогазової галузі.

Проте, потрібно зазначити, що в нашій країні набутий невеликий досвід в напрямку переобладнання дизельних двигунів в газові [18]. Аналіз результатів показує, що для конвертації в нафтогазовій галузі дизельних двигунів в газові багато питань науково-технічного характеру ще доцільно вирішити.

### ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціль роботи – дослідження енергетичної цінності та характеристик дизельних двигунів конвертованих на альтернативне сумішеве газове паливо.

Науково-технічні завдання полягають в наступному:

- потрібне вивчення шляхів вдосконалення робочих процесів переобладнаних газових двигунів, щоб підвищити економічність, потужність та надійність;
- дослідження енергоефективності дизельних двигунів внутрішнього згорання при їхньому переведенні на альтернативні газові палива;
- вдосконалення технології зниження ступеня стиску конвертованих дизелів.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводились на експериментальному стенді, який включав в себе дизельний двигун Д21А1, що був переобладнаний для роботи на альтернативній газовій суміші, та поршневий компресор К-5М. Технічна характеристика дизельного двигуна Д21А1 наведена в табл. 1. Зовнішній вигляд та схема переобладнаного на газове паливо дизельного двигуна Д21А1 наведені, відповідно, на рис. 1 та рис. 2.

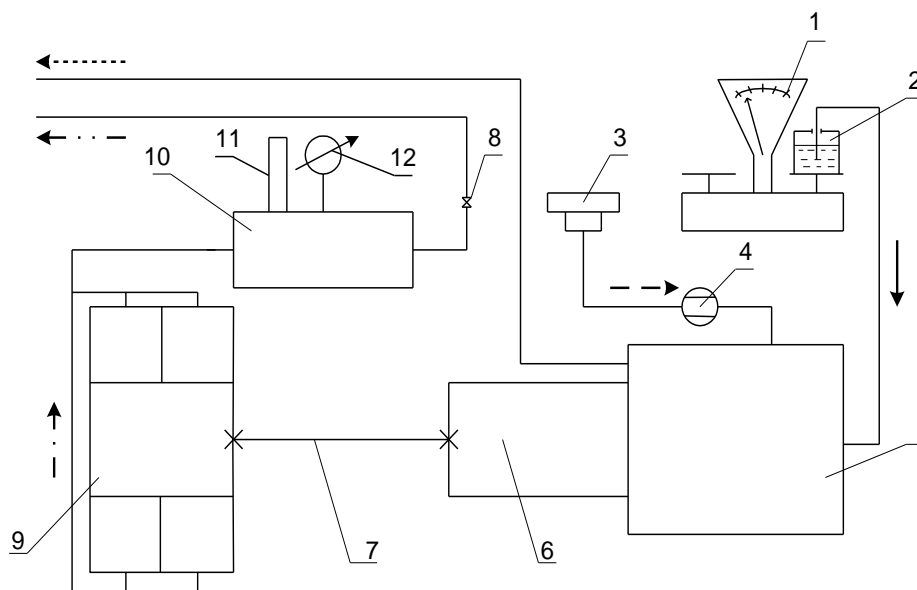
Таблиця 1 – Коротка технічна характеристика експериментального дизельного двигуна Д21А1

№ п/п	Назва параметрів	Один. вимірювання	Значення
1	2	3	4
1	Тип дизельного двигуна	-	Двоциліндровий, чотирьохтактний, повітряного охолодження
2	Робочий об'єм дизельного двигуна	л	2,08
3	Маса дизельного двигуна	кг	280
4	Спосіб сумішоутворення	-	Пряме впорскуванням дизельного палива, нероздільна камера згорання
5	Номінальна потужність двигуна	кВт (к.с.)	18 (25)
6	Ефективна питома витрата палива	г/кВтгод (г/к.с. год)	253 (186)
7	Частота обертання колінчастого вала двигуна при номінальній потужності	об./хв.	1800
8	Частота обертання колінчастого вала двигуна на оборотах холостого ходу	об./хв.	800



1 – конвертований на дизельний двигун Д21А1; 2 – трансмісія;  
3 – компресор К-5М; 4 – пристрій підігріву повітря

Рисунок 1 – Зовнішній вигляд експериментального стенду на базі конвертованого на газ дизельного двигуна Д21А1 для дослідження показників роботи двигуна на альтернативних газових сумішах



→ - напрямок руху палива в системі живлення експериментальної установки; → - напрямок руху повітря в системі живлення експериментальної установки; → - рух повітря до ресивера; ← - рух відпрацьованих газів двигуна в навколишнє середовище; ← - рух повітря в навколишнє середовище; 1 – вага для вимірювання витрати палива; 2 – ємність для палива; 3 – повітряний фільтр; 4 – газовий лічильник; 5 – дизельний двигун; 6 – коробка передач; 7 – карданна передача; 8 – дросель; 9 – компресор; 10 – ресивер; 11 – термометр для вимірювання температури повітря; 12 – манометр.

Рисунок 2 – Схема експериментального стенду на базі конвертованого на газ дизельного двигуна Д21А1 для дослідження показників роботи двигуна на альтернативних газових сумішах

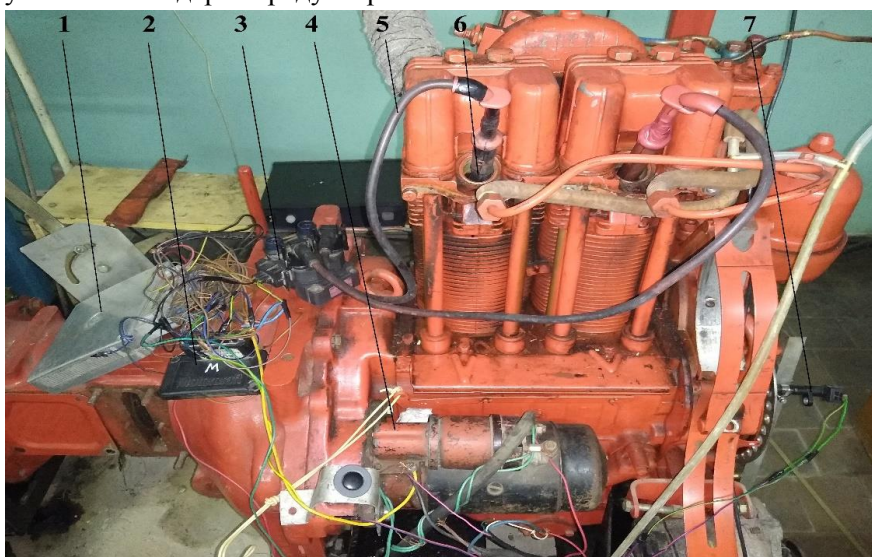
Дизельний двигун Д21А1 конвертовано для роботи на газовій суміші. Для цього з головок блоку були демонтовані дизельні форсунки, нарізана додаткова різьба в каналах розпилювачів форсунок та встановлені свічки запалення. Конструкція головок перероблена таким чином, що замість свічок запалення легко вкрутити назад дизельні форсунки. Конвертований таким чином двигун дозволяє за час до 10 хвилин переходити на різні палива міняючи місцями дизельні форсунки та свічки запалення.

На дизельний двигун була також змонтована стандартна редукторна газова системи живлення 2-го покоління та електронна система запалення власної розробки, які зображені на рис. 2, рис. 3.



1 – впускний тракт; 2 – газований лічильник; 3 – газований редуктор

Рисунок 2 – Стандартна редукторна газова системи живлення 2-го покоління



1 – електронний блок управління; 2 – комутатор; 3 – модуль запалення;

4 – стартер; 5 – високовольтні дроти; 6 – свічки запалення;

7 – датчик положення колін валу

Рисунок 3 – Система запалення конвертованого дизельного двигуна Д21А1

Суміш для живлення переобладнаного двигуна складалась з пропан-бутану, який подавався з газового балону (рис. 4) та піролізного газу, який поступав з циліндричних газових балонів (рис. 5). Маса витраченого газу або дизельного палива визначалась за допомогою електронної ваги (додаток А).

Потужність конвертованого двигуна експериментального стенда розраховувалась за формулами (1) та (2) за даними тисків газу (рис. 6) та витрати.

$$N_{\text{дв}} = \frac{L_1}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  – коефіцієнти корисної дії відповідно коробки перемикачів передач, карданної передачі і поршневого компресора.

$$L_2 = \frac{k}{k-1} \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \text{ Дж/год}, \quad (2)$$

$V_1$  – подача компресора за параметрів  $T_1, p_1$ , м<sup>3</sup>/год;

$P_1$  – абсолютний тиск повітря на вході в компресор, МПа;

приймалось  $p_1 = 0,1$  МПа;

$P_2$  – абсолютний тиск повітря на виході з компресора, МПа;

де  $n$  – показник політропи стиску;

Витрата повітря  $G_2$  компресором визначалась [20] за допомогою діафрагмового витратоміру диференційного перепаду тисків за формулою:

$$G_2 = \alpha F_0 \sqrt{2 \rho \Delta p}, \text{ кг/с}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати діафрагми;

$F_0$  – площа отвору діафрагми, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – густина повітря, що нагнітається компресором, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta p$  – перепад тиску на діафрагмі, Па.

Розрахунок густини повітря проводився за формулою [65]:

$$\rho = \frac{P_K}{R_{\text{нов}} T_K}, \text{ кг/м}^3, \quad (4)$$

де  $T_K, P_K$  – температура (°К) та тиск (Па) повітря на виході компресора;

$R_{\text{нов}}$  – питома газова стала повітря.

Для проведення розрахунків згідно формул (3)-(4) були одержані значення основного конструктивного параметра витратоміра – діаметру отвору діафрагми, а також значення коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\varepsilon$ . Далі витрата повітря компресором визначалась за вимірними значеннями  $\Delta p$ .



Рисунок 4 – Газовий балон з пропан-бутаном



Рисунок 5 – Газові балони з піролізним газом



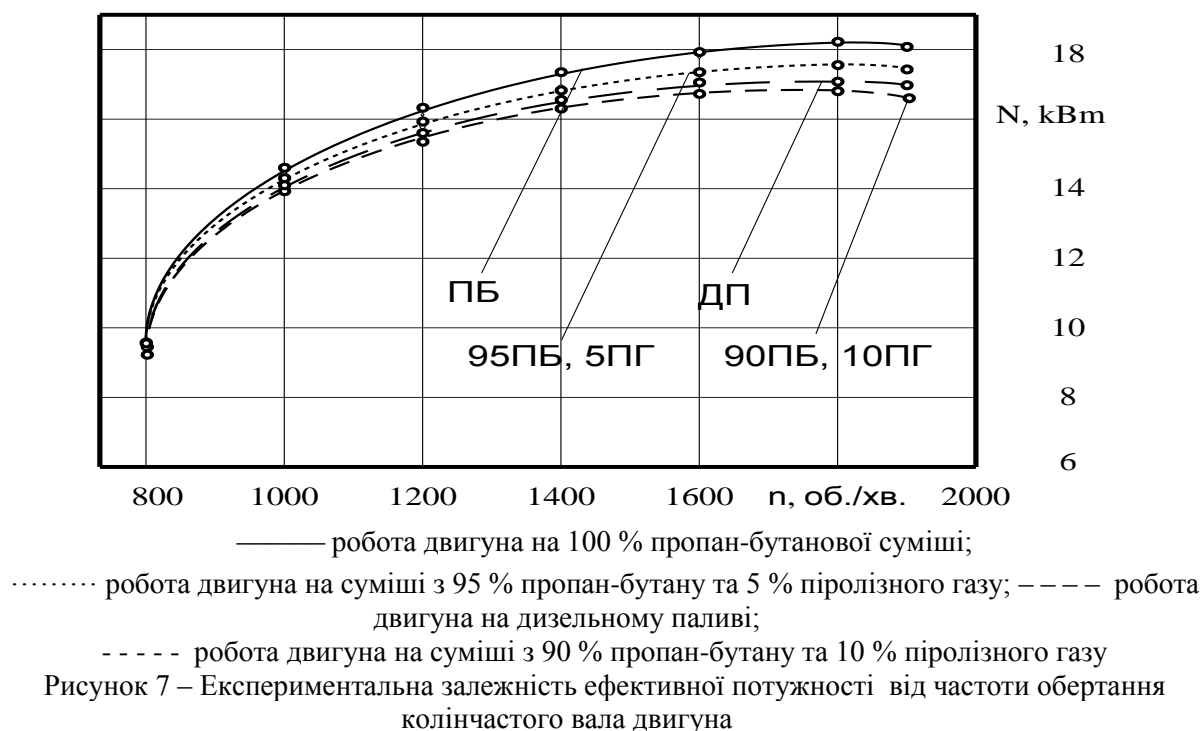
Рисунок 6 – Манометр для вимірювання тиску стисненого компресором газу

Важливе значення для потужності двигуна має теплотворна здатність сумішевого палива та порівняння його з дизельним паливом [20]. Літнє дизельне паливо має теплотворну здатність 43,4 МДж/кг [21]. Нижча теплота згорання пропан-бутанової суміші за однакових частках пропану та бутану по 50 % складає 46,0 МДж/кг. Таким чином, конвертація дизельного двигуна на чисту пропан-бутанову суміш дозволить підняти потужність двигуна приблизно на 6 %.

Газ одержаний при піролізі деревини акації мав показники нижчої теплотворної здатності – 13,83 МДж/кг або в 3,3 рази менше за теплотворну здатність пропан-бутанової суміші, є відновлюваним ресурсом та приблизно в 8,5 разів дешевше за чисту пропан-бутанову суміш. Тому з економічної точки зору доцільним є використання суміші пропан-бутану та піролізного газу.

Розрахунки показують, що для того, щоб альтернативна суміш пропан-бутану та піролізного газу мала показники теплотворної здатності дизельного палива в суміші має бути 92 % пропан-бутану та 8 % піролізного газу. Тому в даних експериментальних дослідженнях визначались показники потужності та питомої витрати палива для альтернативних сумішей: 100 % пропан-бутану; 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу; 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу. Також, для

порівняння, проводилось визначення аналогічних експлуатаційних параметрів для чистого дизельного палива. В цьому випадку паливний бак заповнювався дизельним паливом марки Л виробництва Кременчукського нафтоперегінного заводу [21]. Результати експериментальних досліджень експлуатаційних параметрів конвертованого двигуна зображені на рис. 7.



Експериментально встановлено, що показники максимальної потужності на режимі номінальних оборотів (1800 об./хв.) для різних паливних сумішей склали:

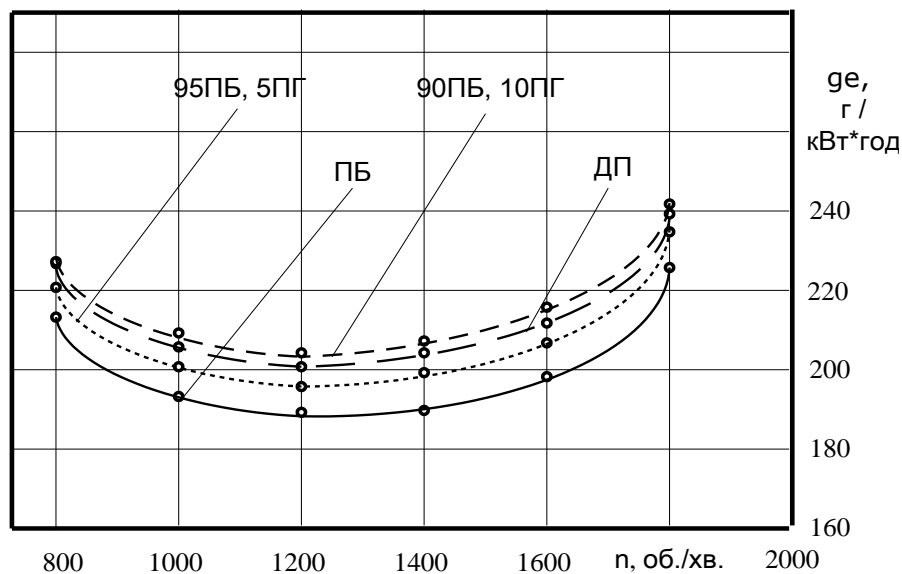
- паспортна максимальна потужність на дизельному паливі – 18,0 кВт;
- експериментально визначена максимальна потужність на дизельному паливі – 17,1 кВт;
- експериментально визначена максимальна потужність на 100 % пропан-бутанової суміші – 18,1 кВт;
- експериментально визначена максимальна потужність на суміші з 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу – 17,5 кВт;
- експериментально визначена максимальна потужність на суміші з 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу – 16,9 кВт.

За результатами експериментальних вимірювань масової витрати палива на протязі фіксованих значень часу (годинної витрати палива  $G_n$ ) та експериментально визначеної потужності були розраховані показники ефективної питомої витрати палива в залежності від частоти обертання колінчастого вала (рис. 11).

Експериментально встановлено, що показники ефективної питомої витрати палива на режимі максимальної потужності  $g_{eN}$  склали:

- експериментально визначена величина ефективної питомої витрати палива на 100 % пропан-бутанової суміші – 225 г/(кВт · год);
- експериментально визначена величина ефективної питомої витрати палива на суміші з 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу – 234 г/(кВт · год);
- експериментально визначена величина ефективної питомої витрати палива на дизельному паливі – 239 г/(кВт · год);
- експериментально визначена величина ефективної питомої витрати палива на суміші з 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу – 242 г/(кВт · год).





- робота двигуна на 100 % пропан-бутанової суміші;  
 ..... робота двигуна на суміші з 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу; - - - - робота двигуна на дизельному паливі;  
 - - - - робота двигуна на суміші з 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу

Рисунок 8 – Експериментальна залежність питомої витрати палива від частоти обертання колінчастого вала двигуна за різного моторного палива

Експериментально встановлено, що показники мінімальної ефективної питомої витрати палива на режимі максимального крутного моменту  $g_{e.min}$  склали:

- експериментально визначена величина мінімальної ефективної питомої витрати палива на 100 % пропан-бутанової суміші – 189 г/(кВт · год);
- експериментально визначена величина мінімальної ефективної питомої витрати палива на суміші з 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу – 196 г/(кВт · год);
- експериментально визначена величина мінімальної ефективної питомої витрати палива на дизельному паливі – 201 г/(кВт · год);
- експериментально визначена величина мінімальної ефективної питомої витрати палива на суміші з 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу – 203 г/(кВт · год).

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отже, в результаті виконаних експериментальних досліджень встановлені залежності зміни максимальної ефективної потужності та ефективної питомої витрати палива конвертованого двигуна на режимі максимальної потужності та на режимі максимального крутного моменту при використанні дизельного палива і газової паливної суміші пропан-бутану з піролізним газом в кількості 5 та 10 %.

Експериментальні дослідження показали, що максимальна ефективна потужність двигуна при використанні пропан-бутану зросла на 5,2 %; максимальна ефективна потужність двигуна при використанні 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу збільшилась на 2,3 %; максимальна ефективна потужність двигуна при використанні 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу знизилась на 1,2 %.

Експериментально встановлено, що величина ефективної питомої витрати палива двигуна при використанні пропан-бутану знизилась на 5,9 %; величина ефективної питомої витрати палива двигуна при використанні 95 % пропан-бутану та 5 % піролізного газу зменшилась на 2,1 %; величина ефективної питомої витрати палива двигуна при використанні 90 % пропан-бутану та 10 % піролізного газу зросла на 1,3 %.

Також під час досліджень конвертованого дизельного двигуна вимірювались об'ємні частки оксидів азоту газоаналізатором „Автотест-02.03П”. Діапазон вимірювань вуглеводнів газоаналізатора складав 0–2000 ppm, абсолютна похибка вимірювань –  $\pm 10$  ppm.

## ВИСНОВКИ

Під час проведення досліджень виконувалася оцінка похибок результатів. З цією метою всі експериментальні дослідження за фіксованих основних параметрів (тиск, вага, температури, темпи нагрівання та ін.) проводились не менше п'яти разів. За підсумками кожної такої серії експериментів обчислювалися усереднені значення досліджуваних величин. Далі обчислювалися значення середньоквадратичних відхилень та їхні коефіцієнти варіації  $U$ . Результати обробки експериментальних даних показали, що всі дослідження проведені при досить малих відносних випадкових похибках. Їхні значення змінювались в залежності від виду палива, тисків і температур від 0,35 % до 1,78 %. Встановлено, що зі збільшенням температури стиснених газів та процесу піролізу величина похибки зростає. При незмінних умовах нагріву і вихідних даних склад кінцевих продуктів був стабільний. Проводячи оцінку результатів аналізу похибок виконаних експериментів, можна зробити висновок про досить високу стабільність результатів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mohan D., Pittman C., & Steele P. Pyrolysis of wood/biomass for biooil: A critical review. *Energy & Fuels*. 2006. № 20. P. 848-889.
2. Arnold S., Moss K., Henkel M., Hausmann, R. Biotechnological perspectives of pyrolysis oil for a biobased economy. *Trends in Biotechnology*. 2017. № 35. P. 925-936.
3. Яновський В.В. Покращення паливної економічності та екологічних показників конвертованих газових двигунів дорожніх транспортних засобів: дис. канд. техн. наук. Київ, 2004. 198 с.
4. Yves S., Diamantis A., Stéphane F. Catalyst technology for biofuel production: Conversion of renewable lipids into biojet and biodiesel. *Oilseeds and fats, crops and lipids*. 2013. № 20 (5). P. 502-510.
5. Матейчик В. П., Яновський В. В., Захарчук В. І. Дослідження газового двигуна з іскровим запалюванням, переобладнаного з дизеля. *Автошляховик України*. 2008. № 4. С.13–16.
6. Марков В. А., Бебенін Е В., Гладышев С. П. Сравнительный анализ альтернативных моторных топлив для дизелей. *Машиностроение*. 2014. № 5. С. 43–48.
7. Марков В. А., Гайворонский А. И., Грехов Л. В. Работа дизелей на нетрадиционных топливах. *Легион-Автодата*. 2008. 464 с.
8. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С. Техніко-економічні аспекти конвертації дизелів у газові двигуни. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2004. № 7 (77). С. 114–117.
9. Гусаков С. В. Перспективы применения в дизелях альтернативных топлив из возобновляемых источников. М.: ИПК РУДН. 2008. 318 с.
10. Матейчик В.П., Захарчук В.І., Сітовський О.П., Захарчук О.В. Дорожні випробування колісного трактора з газовим двигуном. *Техніка і технології АПК*. 2010. № 1. С. 22–26.
11. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С., Матейчик В. П. Дослідження можливості конвертації дизеля в газовий двигун. *Наукові нотатки: міжвузівський збірник*. 2003. № 13. С. 125–129.
12. Кутенёв В. Ф., Лукшо В. А. Разработка газового двигателя на базе дизеля ЯМЗ-236НЕ. Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт. 2007. Режим доступа к источнику: <http://www.nami.ru/subdivisions/engines/energy-efficient-technologies/development/>
13. Бганцев В. Н., Левтеров А. М., Мараховский В. П. Газовый двигатель на базе четырёхтактного дизеля общего назначения. *Мир техники и технологий*. 2003. № 10. С. 74–75.
14. Кабанов А. Н. Основы использования природного газа в качестве топлива для автомобильных двигателей. Х.: ХНАДУ. 2012. 240 с.
15. Бганцев В. Н., Левтеров А. М., Кайдалов А. А., Канило П. М., Мараховский В. П. Газовый двигатель на базе дизеля Д-21. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 36. наук. пр. 2002. Вип. 30. С. 24-27.
16. Liang Y., Zhao X., Chi Z., Rover M., Johnston P., Brown R., Wen Z. Utilization of acetic acid- rich pyrolytic bio- oil by microalga *Chlamydomonas reinhardtii*: Reducing bio- oil toxicity and enhancing algal toxicity tolerance. *Bioresource Technology*. 2013. № 133. P. 500-506.
17. Микитенко В. В. Формування системи забезпечення ефективного використання енергоресурсів у промисловості: автореф. дис. докт. тех. наук. К., 2007. 37 с.

18. Кузьменко А. П. Покращення показників малолітражного газового двигуна з іскровим запалюванням за рахунок вибору параметрів, що визначають процес згоряння: автореф. дис. на здобуття наук. канд. техн. наук. Харків, 2012. 20 с.
19. Леонтьев А. П., Беев Э. А. Расчет аппаратов воздушного охлаждения. Тюмень: ТюмГНГУ. 2000. 74 с.
20. Гнип М. М. Дослідження потужності дизельного двигуна на біодизельному паливі з водорості. Проблеми і перспективи розвитку транспорту: тези доп. VIII-ї всеукр. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених, м. Одеса, 18 квітня 2019 р. Одеса, 2019. С. 70–73.
21. ДСТУ 6081:2009 Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 16 с.
22. Богомолов В. А., Абрамчук Ф. И., Манойло В. М., Воронков А. И., Салдаев С. В. Особенности конструкции экспериментальной установки для проведения исследований газового двигателя 6Ч13/14 с искровым зажиганием. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2007. № 37. С. 43-47.

## REFERENCES

1. Mohan D., Pittman C., & Steele P. Pyrolysis of wood/biomass for biooil: A critical review. *Energy & Fuels*. 2006. № 20. R. 848-889.
2. Arnold S., Moss K., Henkel M., Hausmann, R. Biotechnological perspectives of pyrolysis oil for a biobased economy. *Trends in Biotechnology*. 2017. № 35. R. 925-936.
3. Yanovskyi V.V. Pokrashchennia palyvnoi ekonomichnosti ta ekolohichnykh pokaznykiv konvertovanykh hazovykh dvyhuniv dorozhnykh transportnykh zasobiv: dys. kand. tekhn. nauk. Kyiv, 2004. 198 s.
4. Yves S., Diamantis A., Stéphane F. Catalyst technology for biofuel production: Conversion of renewable lipids into biojet and biodiesel. *Oilseeds and fats, crops and lipids*. 2013. № 20 (5). R. 502-510.
5. Mateichyk V. P., Yanovskyi V. V., Zakharchuk V. I. Doslidzhennia hazovoho dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam, pereobladnanyho z dyzelia. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. 2008. № 4. S.13–16.
6. Markov V. A., Bebenyn E V., Hladyshhev S. P. Sravnytelnyi analiz alternatyvnykh motornykh toplyv dlia dyzeliv. *Mashynostroenye*. 2014. № 5. S. 43–48.
7. Markov V. A., Naivoronskyi A. Y., Hrehhov L. V. Rabota dyzelei na netradytsyonnykh toplyvakh. *Lehyon-Avtodata*. 2008. 464 s.
8. Zakharchuk V. I., Sitovskyi O. P., Kozachuk I. S. Tekhniko-ekonomichni aspekty konvertatsii dyzeliv u hazovi dvyhuny. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia*. 2004. № 7 (77). С. 114–117.
9. Husakov S. V. Perspektivy pryimeneniya v dyzeliakh alternatyvnykh toplyv yz vozobnovliaemykh ystochnykov. М.: YPK RUDN. 2008. 318 s.
10. Mateichyk V.P., Zakharchuk V.I., Sitovskyi O.P., Zakharchuk O.V. Dorozhni vyprobuvannia kolisnogo traktora z hazovym dvyhunom. *Tekhnika i tekhnolohii APK*. 2010. № 1. S. 22–26.
11. Zakharchuk V. I., Sitovskyi O. P., Kozachuk I. S., Mateichyk V. P. Doslidzhennia mozhyvosti konvertatsii dyzelia v hazovyi dvyhun. *Naukovi notatky: mizhvuzivskyi zbirnyk*. 2003. № 13. S. 125–129.
12. Kutenëv V. F., Luksho V. A. Razrabotka hazovoho dvyhatelia na baze dyzelia YaMZ-236NE. Tsentralnyi nauchno-yssledovatel'skyi avtomobyl'nyi y avtomotornyi instytut. 2007. Rezhym dostupa k ystochnyku: <http://www.nami.ru/subdivisions/engines/energy-efficient-technologies/development/>
13. Bhandsev V. N., Levterov A. M., Marakhovskyi V. P. Hazovyi dvyhatel na baze chetyrekhtaktnoho dyzelia obshcheho naznacheniya. *Myr tekhniky y tekhnolohiyi*. 2003. № 10. S. 74–75.
14. Kabanov A. N. Osnovy yspolzovaniya pryrodnoho haza v kachestve toplyva dlia avtomobyl'nykh dvyhatelei. Kh.: KhNADU. 2012. 240 s.
15. Bhandsev V. N., Levterov A. M., Kaidalov A. A., Kanylo P. M., Marakhovskyi V. P. Hazovyi dvyhatel na baze dyzelia D-21. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia. Zb. nauk. pr.* 2002. Vyp. 30. S. 24-27.
16. Liang Y., Zhao X., Chi Z., Rover M., Johnston P., Brown R., Wen Z. Utilization of acetic acid- rich pyrolytic bio- oil by microalga *Chlamydomonas reinhardtii*: Reducing bio- oil toxicity and enhancing algal toxicity tolerance. *Bioresource Technology*. 2013. № 133. R. 500-506.
17. Mykytenko V. V. Formuvannia systemy zabezpechennia efektyvnoho vykorystannia enerhoresursiv u promyslovosti: avtoref. dys. dokt. tekhn. nauk. K., 2007. 37 s.

18. Kuzmenko A. P. Pokrashchennia pokaznykiv malolitrzhnoho hazovoho dvyhuna z iskrovym zapaliuvanniam za rakhunok vyboru parametriv, shcho vyznachaiut protses zghoriannia: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. kand. tekhn. nauk. Kharkiv, 2012. 20 s.
19. Leontev A. P., Beev Э. A. Raschet apparatov vozdushnoho okhlazhdeniia. Tiumen: TiumHNHU. 2000. 74 s.
20. Гніп М. М. Doslidzhennia potuzhnosti dyzelnoho dvyhuna na biodyzelnomu palyvi z vodorosti. Problemy i perspektyvy rozvytku transportu: tezy dop. VIII-yi vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv ta molodykh vchenykh, m. Odesa, 18 kvitnia 2019 r. Odesa, 2019. S. 70–73.
21. DSTU 6081:2009 Palyvo motorne. Efiry metylovi zhyrnykh kyslot olii i zhyriv dlia dyzelnykh dvyhuniv. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. 16 s.
22. Bohomolov V. A., Abramchuk F. Y., Manoilo V. M., Voronkov A. Y., Saldaev S. V. Osobennosti konstruktsyy eksperymentalnoi ustanovky dlia provedeniia yssledovanyi hazovoho dvyhatelia 6Ch13/14 s uskrovym zazhyhanym. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu. 2007. № 37. S. 43–47.

***Гніп М. Research of powerful and fuel - economic characteristics of diesel engines converted to alternative mixed gas fuel***

The energy values and indicators of diesel engines converted to alternative mixed gas fuel were studied. Theoretical studies of the conversion of diesel engines to gas engine fuels have been carried out. Formulated methodology and planning of experimental studies of the use of alternative mixed fuel in converted diesel engines. Bench studies were conducted. The diesel engine was converted to run on an alternative gas mixture. The dependence of the effective power  $N$  on the frequency of rotation of the crankshaft of the engine  $n$  with different engine fuel was determined experimentally. For a comparative evaluation of the performance of the engine on diesel fuel with the corresponding performance of the convertible diesel engine on a propane-butane mixture with additives based on pyrolysis gas in the amount of 5 and 10%, the load characteristics of the engine at fixed crankshaft rotation frequencies were recorded. Before measuring the parameters, the engine was operated at the specified mode for at least 5 minutes for a stable flow of the work process. The results of the measurements were recorded in the test protocol with three repetitions at each engine operating mode. Experimental studies showed that the maximum effective power of the engine when using pure propane-butane instead of diesel fuel increased from 17.1 to 18.1 kW or by 5.2%; the maximum effective power of the engine when using a mixture of 95% propane-butane and 5% pyrolysis gas instead of diesel fuel increased from 17.1 to 17.5 kW or by 2.3%; the maximum effective power of the engine when using a mixture of 90% propane-butane and 10% pyrolysis gas instead of diesel fuel decreased from 17.1 to 16.9 kW or by 1.2%.

**Key words:** pyrolysis, calorific value, alternative fuels, diesel engine, engine conversion to gas.

*ГНІП Марія Михайлівна*, доцент, кафедра автомобільного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, E-mail: marichka\_gnip@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

*HNYP Mariia*, Docent, Department of Automobile Transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, E-mail: marichka\_gnip@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

DOI 10.36910/automash.v1i20.1040