

УДК 621.4

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.238-244](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.238-244)**І. М. Микитій**, д.ф.*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна; e-mail: mukutiy@gmail.com*

Експериментальні дослідження підвищення енергозбереження силових приводів при їхньому переведенні на газоподібні продукти конвертації метанолу

У статті представлені результати експерименту, спрямованого на дослідження продуктивності серійного дизельного двигуна D21A1, модернізованого для роботи на газоподібних продуктах, отриманих в результаті конверсії метанолу, як альтернативному паливі. Проведені випробування експериментально підтвердили доцільність та потенційні переваги переобладнання дизельних двигунів для роботи на паливі, отриманому з метанолу. Для оцінки впливу різних факторів на підвищення паливної ефективності було проведено серію експериментів з використанням реактора конверсії метанолу. Результати показали, що термохімічне використання тепла зменшило витрату палива на 6–8%, а оптимізація робочого процесу двигуна забезпечила додаткову економію палива приблизно на 4–6%. Для більш глибокого аналізу факторів, що сприяють покращенню паливної економічності, було проведено подальші експериментальні дослідження. Вони підтвердили переваги використання газоподібних продуктів конверсії метанолу, що призвело до збільшення ефективної потужності двигуна на 14% порівняно зі звичайним дизельним паливом, хоча й з незначним збільшенням витрати палива. Враховуючи, що середня вартість метанолу становить лише 10–20% від ціни дизельного палива, переобладнання дизельних двигунів для роботи на продуктах конверсії метанолу виявляється економічно вигідним.

енергозбереження, дизельний двигун, ефективна потужності, альтернативне паливо, метиловий спирт, газова суміш, відпрацьовані гази

Постановка проблеми. Більшість транспортних засобів нафтогазової галузі та інших сфер оснащені двигунами внутрішнього згоряння з дизельними системами живлення. Робота таких двигунів потребує значних обсягів дорогого дизельного пального, яке, до того ж, спричиняє високу токсичність відпрацьованих газів. Це зумовлює доцільність переходу на більш доступні та екологічно чисті альтернативні види палива [2]. Тривала експлуатація дизельних двигунів у нафтогазовому секторі, навіть після завершення їх виробництва, зумовлює необхідність їх адаптації до більш економічних та екологічно прийнятних видів палива, таких як газ. Одним з перспективних рішень для використання метанолу в поршневих двигунах, що дозволяє обійти його відомі недоліки, є його термохімічна конверсія. Цей процес передбачає використання тепла відпрацьованих газів для хімічного перетворення метанолу в суміш горючих газів (CO , H_2 , CH_4) за допомогою термохімічної установки, що є комплексом технологій утилізації тепла для здійснення ендотермічної реакції конверсії. В результаті конверсії хімічна енергія отримана з продуктів конверсії метанолу перевищує енергію вихідного палива на величину утилізованої енергії вихлопних газів, яка таким чином повторно бере участь в організації робочого циклу [3]. Первинною оцінкою ефективності термохімічного перетворення палива є порівняння теплотворної здатності вихідного палива та отриманих продуктів. Відомо, що для етанолу цей процес може збільшити теплоту згоряння на 6–25%, що потенційно призводить до зменшення необхідної кількості палива для виробництва заданої кількості енергії. Застосування подібної технології термохімічного перетворення метанолу розглядається як спосіб підвищення економічності енергетичних установок, що працюють на метанолі. Крім того, це відкриває перспективи для безпечного використання продуктів конверсії метанолу в різних типах двигунів, де застосування рідкого метанолу є небажаним через

його негативний вплив на змащування та зношування деталей. Отже, метою даної наукової роботи є дослідження основних експлуатаційних параметрів двигуна при використанні процесу термохімічного перетворення етанолу з використанням вторинного тепла відпрацьованих газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз різних джерел з цієї проблеми показує на те, що поки немає точних відомостей щодо енерговитрат трансмісій підіймальних установок для ремонту свердловин нафтогазової галузі [2] та про параметри експлуатації дизельних двигунів, які конвертовані на альтернативну паливну газову суміш, яка складається з продуктів конверсії метанолу. На показники енергоспоживання трансмісій впливають температурні умови навколишнього середовища та на самі агрегати трансмісії. Водночас, на енергетичну цінність альтернативної газової паливної суміші, отриманої з продуктів конверсії метанолу, ключовий вплив має кількість теплової енергії, переданої від відпрацьованих газів.

Слід зазначити, що факторні плани експериментів гарантують отримання достовірних значень коефіцієнтів у рівняннях регресії при мінімальній кількості дослідів лише за умови, що порядок регресійного рівняння відомий до початку експерименту. Більше того, застосування факторних планів можливе лише при наявності достатньо конкретних теоретичних знань про досліджувані процеси.

У випадках, коли характер залежностей між основними досліджуваними факторами є невідомим, використання стандартного факторного плану може призвести до хибних висновків. Наприклад, у контексті дослідження процесів отримання газоподібних продуктів конверсії метанолу можлива наявність локальних екстремумів у залежностях виходу газоподібних або рідких продуктів від кількості переданого тепла вихлопних газів, що ускладнює застосування традиційних факторних планів.

Що стосується виходу газоподібних продуктів конверсії метанолу, то за результатами аналізу літературних джерел [6, 7] можна зробити обґрунтований висновок, що головним чинником утворення газоподібних продуктів конверсії метанолу є кількість переданої теплоти та температура відпрацьованих газів. Головною метою в даних експериментах було запропоновано склад остаточних продуктів палива (рідких і газоподібних). Основними змінними чинниками, що визначають цей склад, є температури відпрацьованих газів та метанолу, темп прогрівання двигуна, склад продуктів конверсії метанолу.

Постановка завдання. Основна мета дослідження полягає у визначенні можливостей підвищення енергоефективності силових приводів шляхом їх переведення на газоподібне паливо, отримане з метанолу. Експериментальна частина роботи була спланована таким чином, щоб мінімізувати похибки вимірювань та забезпечити надійність отриманих даних.

Завдання, які необхідно вирішити:

- забезпечення коректної оцінки випадкових похибок;
- мінімізація систематичних помилок;
- підтримка стабільності характеристик палива протягом усього експерименту;
- забезпечення відтворюваності експериментальних умов та стабілізація зовнішніх факторів, що можуть впливати на результати.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження проводилися з метою оцінки енергозбереження силових приводів шляхом їх переведення на газоподібне паливо з метанолу. Увага була приділена всебічному порівнянню паливно-економічних характеристик та показників потужності дизельного двигуна Д21А1, який пройшов переобладнання, оцінюючи його роботу на традиційному дизельному паливі та на газоподібних продуктах метанолу. Для реалізації цього двигун був дооснащений

термохімічним реактором, який використовував тепло відпрацьованих газів для перетворення рідкого метанолу в газоподібну суміш, що потім через газовий редуктор подавалася у впускний колектор. Кількість спожитого палива фіксувалася електронною вагою.

Експериментальний стенд був сконструйований таким чином, щоб забезпечити роботу двигуна в трьох режимах подачі палива: розпилення рідкого дизельного палива форсунками, подача газоподібних продуктів конверсії метанолу через газовий редуктор та розпилення рідкого метанолу форсунками. Подача метанолу з паливного бака здійснювалася електричним насосом через регулятор, що підтримував тиск 0,5 МПа для оптимізації його подачі з урахуванням низької теплоти згоряння. Регулювання паливо-повітряної суміші забезпечувалося дросельною заслінкою. Для конверсії метанолу використовувалося тепло вихлопних газів або автономний підігрівач Вебасто (для пуску та прогріву). Додатковий підігрівач Вебасто Thermo Top C (5 кВт) встановлювався перед газовим редуктором для забезпечення надійного холодного пуску на газоподібному метанолі та відключався при досягненні температури вихлопних газів 300 °С. Реактор конверсії метанолу був інтегрований у випускную систему двигуна.

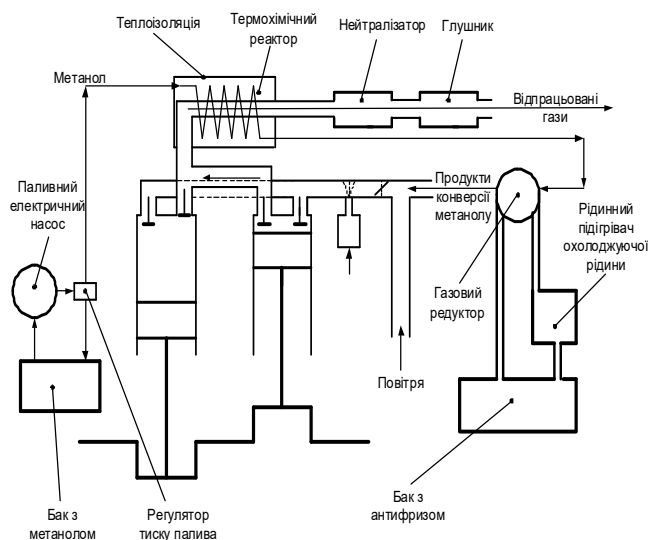


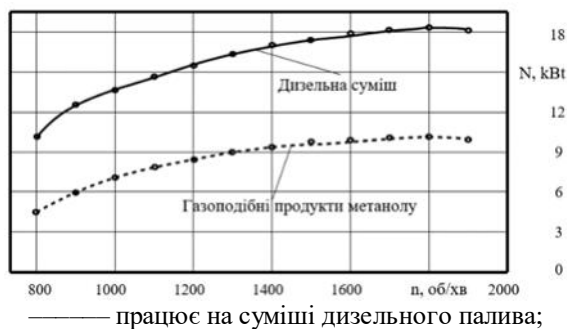
Рисунок 1 – Відображає схематичне зображення експериментального стенду з ключовим елементом – термохімічним реактором, який використовувався для вивчення показників роботи дизельного двигуна Д21А1 при використанні газоподібних продуктів метанолу як палива
Джерело: розроблено на підставі [7].

Усі експерименти проводилися в стабільних лабораторних умовах (температура 293-296 К). Для точного вимірювання температур вихлопних газів та газоподібних продуктів метанолу використовувалися як контактні (хромель-копелеві термопари), так і безконтактні (цифровий пірометр) методи [7]. Для забезпечення достовірності результатів кожен експеримент при фіксованих параметрах повторювався не менше п'яти разів. Дослідження проводилися при повному навантаженні двигуна на різних фіксованих обертах (800-1800 об/хв) з використанням методики, що відповідають вимогам ГОСТ 14846-91 для стаціонарних режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння.

На рисунку 2 представлені експериментальні дані, що ілюструють зовнішню швидкісну характеристику дизельного двигуна моделі Д21А1. На графіку демонструється порівняння продуктивності двигуна при використанні стандартного дизельного палива та газоподібних продуктів конвертації метанолу, причому останнє досліджувалося за фіксованого співвідношення повітря до метанолу 14,3 кг/кг.

Рисунок 3 ілюструє експериментально отримані зовнішні швидкісні характеристики переробленого двигуна Д21А1 при його застосуванні дизельного

палива, метанолу та продуктах його конверсії в рамках випробувальних циклів. Аналіз експериментальних значень ефективної потужності (N) виявив, що при номінальній частоті обертання колінчастого вала (1800 хв^{-1}) потужність становила 18,1 кВт при використанні дизельного палива та 10,1 кВт при роботі на продуктах перетворення метанолу (при співвідношенні 1 кг метанолу на 14,3 кг повітря). В цілому, у всьому дослідженому діапазоні швидкості обертання двигуна, потужність двигуна при роботі на газоподібних продуктах метанолу була на 45% меншою, як при використанні дизельного палива.



..... працює на суміші дизельного палива;

..... працює на газоподібних продуктах метанолу;

Рисунок 2 – Експериментально отримані значення корисної потужності двигуна (N) від його частоти обертання (n) при використанні різних видів моторного палива

Джерело: розроблено на підставі [7].

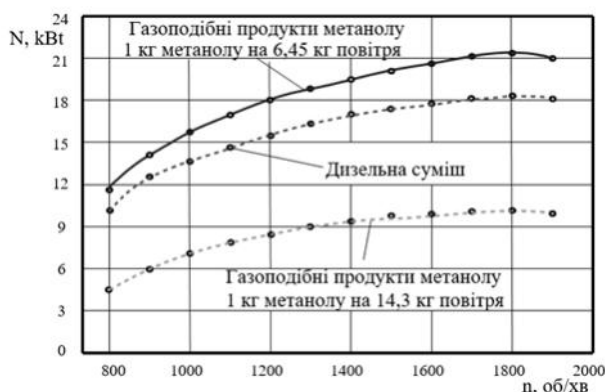


Рисунок 3 – Ілюструє експериментальні значення залежності ефективної потужності (N) досліджуваного двигуна від його швидкості обертання (n) для досліджених палив

Джерело: розроблено на підставі [7].

З аналізу експериментальних даних щодо потужності, представлених на рисунку 3, виявлено, що на високих обертах колінчастого вала (1800 хв^{-1}) ефективна потужність двигуна при роботі на продуктах перетворення метанолу (із співвідношенням 1 кг метанолу на 6,45 кг повітря) досягла 21,2 кВт. На протязі усього дослідження із зміною швидкості обертання двигуна, значення потужності двигуна при застосуванні газоподібних продуктів метанолу (1:6,45) збільшилося на 14% стосовно його роботи на дизельній суміші.

Рисунок 4 демонструє експериментально отримані залежності витрати палива при різній швидкості обертання (n) дизельного двигуна Д21А1 при застосуванні дизельного палива, так і на газових продуктах метанолу при співвідношенні повітря до метанолу 14,3 кг/кг.

Аналіз експериментальних значень питомої витрати палива виявив, що при роботі на дизельному паливі мінімальне значення цього показника ($212 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$) спостерігалось в діапазоні обертів $1200\text{--}1250 \text{ хв}^{-1}$, а при високих обертах колінчастого вала (1800 хв^{-1}) становило $248 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$. При використанні газоподібних продуктів метанолу мінімальне споживання палива зросло до $386 \text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$, а на високих

обертах двигуна – до 451 г/(кВт·год). У середньому, по всьому діапазону роботи двигуна, витрати палива при роботі на газоподібних продуктах метанолу (при співвідношенні 14,3 кг повітря на 1 кг метанолу) збільшилися на 80-84% порівняно з дизельним паливом. Також було проведено порівняльне дослідження роботи двигуна на рідкому метанолі та на продуктах його перетворення. Результати показали, що при роботі на газоподібних продуктах метанолу спостерігалось зменшення витрати палива яке складає 10-14% залежності від обертів колінчастого вала та його навантаження на двигун, порівняно з використанням рідкого метанолу.



— двигун працює на суміші дизельного палива; двигун працює на газоподібних продуктах метанолу;

Рисунок 4 – Ілюструє експериментальні значення витрати палива в залежності від обертів (n) двигуна для різних видів палива

Джерело: розроблено на підставі [7].

Для кількісної оцінки впливу різних факторів на підвищення економічності двигуна було проведено експерименти при яких застосовано реактор для конверсії метанолу з незалежним електричним нагрівачем, що виконувало роботу без регенерації тепла вихлопних газів. Встановлено, що економія палива за рахунок термохімічної утилізації теплоти становила 6-8%, а завдяки вдосконаленню робочого процесу – близько 4-6%. З метою детального аналізу, що сприяють для більшої паливної економічності досліджуваного двигуна, було проведено кілька експериментальних досліджень. На першому етапі цих випробувань в циліндри двигуна подавали суміш-газу, склад якого (за об'ємними частками) був аналогічним складу газоподібних продуктів метанолу: 33% CO та 67% H₂.

Використання автономного електричного підігрівача унеможливило прояв ефекту утилізації тепла вихлопних газів. Однак, при роботі двигуна з термохімічним реактором відбувалася утилізація тепла відпрацьованих газів, яке перетворювалося на газоподібне паливо з покращеними енергетичними властивостями, що забезпечувало роботу двигуна за регенеративним циклом. Оскільки склад палива в обох випадках був незмінним, покращення паливної економічності, зафіксоване в ході експериментів, безсумнівно є наслідком термохімічної регенерації енергії вихлопних газів. На рисунку 5 показано дослідження витрати палива в залежності від швидкості обертання (n) дизельного двигуна D21A1 при застосуванні різних видів палива, та газоподібних продуктів метанолу.

Аналіз дослідження витрати палива показує мінімальні значення витрати для дизельного палива: 212 г/(кВт·год) при середніх обертах (1200- хв⁻¹), для газових продуктів метанолу 386 г/(кВт·год) та для метанолу 460 г/(кВт·год). При високих обертах двигуна (1800 хв⁻¹) споживання палива складає для дизеля 248 г/(кВт·год), для газових продуктів метанолу 451 г/(кВт·год) та для метанолу 545 г/(кВт·год).

У середньому, при різних режимах обертання двигуна, витрати палива при роботі на 100% газоподібних продуктах метанолу була на 81-85% вищою, а при роботі на 100% метанолі – на 116-120% вищою, ніж при використанні дизельного палива.

Експерименти також показали, що використання термохімічного реактора на всіх навантажувальних режимах двигуна призвело до покращення економічних показників робочого циклу в середньому на 10-14% порівняно з роботою на чистому метанолі. При низьких обертах (850 хв^{-1}) економічність була близькою до показників при роботі на рідкому метанолі через знижений температурно-енергетичний рівень вихлопних газів. Найбільше зростання економічності (на 14%) спостерігалось при 1250 хв^{-1} та температурі вихлопних газів 400°C , що пояснюється оптимальним балансом між споживаною реактором тепловою енергією та енергією теплоносія.

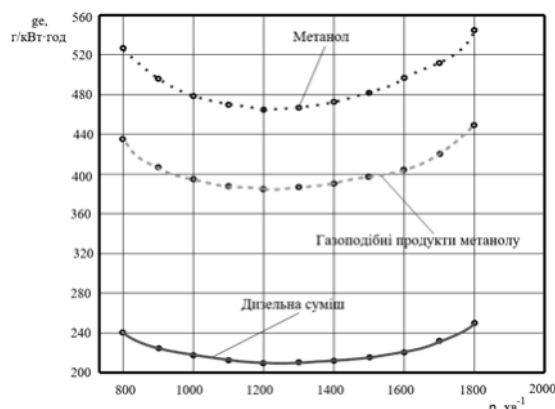


Рисунок 5 – Експериментально отримані значення споживання палива при роботі двигуна в залежності від його обертів (n) при застосуванні метанолу в різних станах та дизельного палива
Джерело: розроблено на підставі [7].

Дослідження виявили, що при температурі вихлопних газів яка підводиться до реактор становить вище 400°C , робота реактора, зокрема за вмістом водню, досягає максимуму, що суттєво підвищує ефективність робочого циклу. Покращення економічних показників дизельного двигуна з термохімічною утилізацією тепла при роботі на водневомісному паливі зумовлене як частковою утилізацією тепла вихлопних газів, так і покращенням кінетики згоряння в присутності водню.

Висновки. Пропонована конверсійна система, ключовим елементом якої є компактний та простий у встановленні термохімічний реактор, може бути застосована до будь-яких серійних дизельних двигунів. Експериментальні дослідження двигуна D21A1 показали переваги використання газоподібних продуктів метанолу, які забезпечують зростання ефективної потужності на 14% порівняно з дизельним паливом, хоча й супроводжуються збільшенням питомої витрати палива на 81-85%. Використання чистого метанолу призводить до зниження потужності та ще більшого зростання витрати палива. Важливим є те, що розроблені системи відкривають можливості для комплексної оптимізації характеристик двигунів, включаючи утилізацію відхідного тепла, покращення згоряння та екологічності, а також забезпечують перехід на альтернативні палива з відновлюваних джерел, сприяючи таким чином ресурсозбереженню. Будь-який серійний дизельний двигун, як новий, так і той, що вже експлуатується, може бути використаний як базовий для цієї системи. Її ключовий елемент це термохімічний реактор – який має просту конструкцію теплообмінника та розміри звичайного глушника, що забезпечує легкість встановлення у випускную систему двигуна.

Експериментальні дослідження дизельного двигуна D21A1, що був переобладнаний для роботи на різних видах палива – суміш дизельного палива, метанол як паливо та газоподібні продукти метанолу – виявили значні зміни в ефективній потужності. Зокрема, при використанні метанолу (співвідношення 1:6,45 з повітрям) спостерігалось зниження потужності на 5% порівняно з дизельним паливом. Однак, при застосуванні газоподібних продуктів метанолу (аналогічне співвідношення

з повітрям), потужність двигуна зросла на 14% відносно його роботи на дизелі. Ці зміни були зафіксовані в усьому діапазоні робочих обертів двигуна.

Зроблені дослідження споживання палива показали, що від обертів дизельного двигуна Д21А1, який використовує дизельне паливо, метанол та газоподібні продукти метанолу було виявлено, що витрата двигуна, що працює на продуктах перетворення метанолу, у порівнянні з дизельним паливом, зросло на 81-85 %; питома витрата палива двигуна, який використовує метанол як палива, у порівнянні з дизельним паливом, зросло на 116-120 %.

Список літератури

1. Криштопа С. І., Криштопа Л. І., Микитій І. М., Гнип М. М., Козак Ф. В. Підвищення економічних показників дизельних двигунів шляхом їхнього переведення на газоподібні продукти конверсії метилового спирту. *Нові рішення у сучасній техніці та технологіях*. 2021. № 1 (35). С. 67–80.
2. Денисюк С. П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. Вип. 2. С. 7–22.
3. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С. Техніко-економічні аспекти конвертації дизелів у газові двигуни. *Вісник СХУ імені В. Даля*. 2004. Вип. 7 (77). С. 114–117.
4. Криштопа С. І., Криштопа Л. І., Микитій І. М., Гнип М. М., Козак Ф. В. Покращення екологічних параметрів дизельних двигунів при їхньому переведенні на продукти конверсії метанолу. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2021. № 1 (16). С. 91–105.
5. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С. Техніко-економічні аспекти конвертації дизелів у газові двигуни. *Вісник СХУ імені В. Даля*. 2004. Вип. 7 (77). С. 114–117.
6. Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С., Матейчик В. П. Дослідження можливості конвертації дизеля в газовий двигун. *Наукові нотатки: міжвуз. зб.* 2003. Вип. 13. С. 125–129.
7. Микитій І. М. Покращення енергоефективності силових приводів підймальних установок для ремонту свердловин : дис. ... д-ра філософії : 133 «Галузеве машинобудування». Івано-Франківськ, 2025. 249 с.

References

1. Kryshchop, S. I., Kryshchop, L. I., Mykytii, I. M., Hnyp, M. M., & Kozak, F. V. (2021). *Improving the economic performance of diesel engines by converting them to gaseous products of methanol conversion*. *New Solutions in Modern Engineering and Technology*, 1(35), 67–80 [in Ukrainian].
2. Denysiuk, S. P. (2013). *Formation of energy efficiency policy – modern challenges and European guidelines*. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, (2), 7–22 [in Ukrainian].
3. Zakharchuk, V. I., Sitovskiy, O. P., & Kozachuk, I. S. (2004). *Technical and economic aspects of diesel conversion into gas engines*. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 7(77), 114–117 [in Ukrainian].
4. Kryshchop, S. I., Kryshchop, L. I., Mykytii, I. M., Hnyp, M. M., & Kozak, F. V. (2021). *Improving the environmental parameters of diesel engines when converted to methanol conversion products*. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(16), 91–105 [in Ukrainian].
5. Zakharchuk, V. I., Sitovskiy, O. P., Kozachuk, I. S., & Mateichyk, V. P. (2003). *Study of the possibility of converting a diesel engine into a gas engine*. *Scientific Notes: Interuniversity Collection*, (13), 125–129 [in Ukrainian].
6. Mykytii, I. M. (2025). *Improving the energy efficiency of power drives of lifting units for well repair* (Doctoral dissertation, specialty 133 "Industrial Engineering"). Ivano-Frankivsk [in Ukrainian].

Ivan Mykytii, PhD

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

Experimental Studies on Increasing Energy Saving of Power Drives During Their Conversion to Gaseous Products of Methanol Conversion

The article presents the results of an experiment aimed at investigating the performance of a serial D21A1 diesel engine retrofitted to operate on gaseous products derived from methanol conversion as an alternative fuel. The conducted tests experimentally confirmed the feasibility and potential benefits of converting diesel engines to operate on methanol-derived fuels. To assess the impact of various factors on improving fuel efficiency, a series of experiments was carried out using a methanol conversion reactor. The results demonstrated that thermochemical utilization of heat reduced fuel consumption by 6–8%, while optimization of the engine's working process provided an additional fuel saving of approximately 4–6%. For a more in-depth analysis of the factors contributing to improved fuel economy, further experimental studies were conducted. These confirmed the advantages of using gaseous products from methanol conversion, which led to a 14% increase in effective engine power compared to conventional diesel fuel, albeit with a slight increase in fuel consumption. Considering that the average cost of methanol is only 10–20% of the price of diesel fuel, converting diesel engines to operate on methanol conversion products proves to be economically advantageous.

energy saving, diesel engine, efficient power, alternative fuel, methyl alcohol, exhaust gases

Одержано (Received) 19.05.2025

Прорецензовано (Reviewed) 13.08.2025

Прийнято до друку (Approved) 27.08.2025