



Прийнято 13.12.2025. Прорецензовано 20.03.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 621.43.06

DOI: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-211-222

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА Д21А1 ШЛЯХОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЙОГО РОБОТИ ЗА ГАЗОДИЗЕЛЬНИМ ЦИКЛОМ З ВИКОРИСТАННЯМ БІОГАЗОВОГО ПАЛИВА

Мельник В. М.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>
e-mail: vasyi.melnyk@nung.edu.ua

Гнип М. М.*

Доктор філософії, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3662-0941>
e-mail: mariia.hnyp@nung.edu.ua

Анотація. Переважна більшість бензинових двигунів внутрішнього згорання та деякі дизельні двигуни з метою зниження витрат на паливо переобладнуються для роботи на газоподібному пальному. Це, в свою чергу, може створити ряд труднощів, пов'язаних із низькою теплотою згорання неочищеного біогазу, наявністю вологи та токсичністю двигунів. Проблема низької теплоти згорання можна вирішити, очистивши біогаз від небажаних компонентів та вологи. Для вирішення питання токсичності двигунів виникає потреба у дослідженні основних екологічних показників їх роботи у процесі експлуатації на біогазовому паливі. За результатами досліджень нами встановлено, що значний вплив на викиди NO_x двигуна Д21А1 має коефіцієнт надлишку повітря α . Найкращі ефективні показники забезпечуються на цьому режимі при $\alpha=1,2$. При збільшенні α від 0,9 до 1,2 вміст, наприклад, оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах зменшується на 18,6 % при застосуванні дизельного палива та 31,3 % - при використанні біогазового палива. Також у процесі досліджень нами встановлено, що викиди NO_x дизельного двигуна Д21А1 при його роботі за газодизельним циклом нижчі в середньому на 21,9 % у порівнянні з викидами на дизельному паливі. Значний вплив на викиди NO_x має також кут випередження впорскування палива. Так, за зміни кута випередження впорскування від 15 до 20° викиди зменшуються на 13,2 % при застосуванні дизельного палива та 9,2 % - при використанні біогазового палива. Дослідженням також встановили, що за зростання кута випередження впорскування від 20 до 30° викиди NO_x зростають на 14,1 % при застосуванні дизельного палива та 8,9 % - при використанні біогазового палива. Отже, за даним показником оптимальний режим досягається за зростання кута випередження впорскування палива 20°. За результатами дослідження зміни токсичності двигуна Д21А1 в залежності від навантаження встановлено, що із зростанням навантаження на двигун в діапазоні з 6 до 18 кВт відбувається зростання об'єму викидів NO_x на 44,2 % при застосуванні дизельного палива та 40,4 % - при використанні біогазового палива. Проте, можна відзначити, що викиди двигуна Д21А1 під час роботи на двопаливному режимі при навантаженні нижчі на 26,2 % у порівнянні з роботою на дизельному паливі.

Ключові слова: двигун, біогаз, дизельне паливо, техніко-експлуатаційні показники, навантаження.

Запропоноване посилання: Мельник, В. М. & Гнип, М. М. (2026). Підвищення екологічної безпеки дизельного двигуна Д21А1 шляхом забезпечення його роботи за газодизельним циклом з використанням біогазового палива. Нафтогазова енергетика, 1(45), 211-222. doi: 10.31471/1993-9868-2026-1(45)-211-222.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Переважає більшість бензинових двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та деякі дизельні двигуни з метою зниження затрат на паливо переобладнуються для роботи на газоподібному пальному. Це, в свою чергу, може створити ряд труднощів, пов'язаних із низькою теплою згоряння неочищеного біогазу, наявністю вологи та токсичністю ДВЗ.

Проблему низької теплоти згоряння можна вирішити, провівши очищення біогазу від небажаних компонентів та вологи.

Для вирішення питання токсичності ДВЗ виникає потреба у дослідженні основних екологічних показників роботи ДВЗ у процесі експлуатації на біогазовому паливі. На основі результатів проведених досліджень можна буде встановити оптимальні параметри роботи ДВЗ на біогазовому паливі.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

На сучасному етапі розвитку транспорту багато досліджень присвячено ефективності роботи дизельного двигуна з живленням у двопаливному режимі за газодизельним циклом роботи. Велика частка досліджень проводилася для оцінки продуктивності, викидів і параметрів згоряння.

У роботі [1] пропонують переробку твердих відходів від відпрацьованого чаю (STW) і відходи кулінарної олії (WCO) на біогазове пальне шляхом анаеробного зброджування. У цій дослідницькій роботі була зроблена спроба вивчити можливість використання біодизеля з WCO та біогазу, отриманого з STW, як палива для роботи двигуна із запалюванням від стиснення (CI) на двох паливних режимах.

Дослідники [2, 3] у процесі використання біогазового палива у двопаливному режимі роботи одноциліндрового чотиритактного дизельного двигуна при повному навантаженні у середньому спостерігається зниження викидів оксиду вуглецю та вуглеводнів на 17,67% та 17,18% при підвищенні міри стиску з 17 до 18. Однак, для тих самих налаштувань міри стиску, спостерігається збільшення обсягу оксидів азоту, а також вуглецю викидів діоксиду на 42,85% та 14,13% відповідно.

У дослідженнях [4-6] отримали нижчі витрати біогазу та фракції метану, однак збільшення швидкості потоку біогазу та фракції метану покращує заміщення дизельного палива. Дослідження показали, що крутний момент двигуна був головним фактором, що вплинув на більшість індексів продуктивності. Об'ємна

ефективність і загальний коефіцієнт еквівалентності також залежать від фракції метану в біогазі.

Науковці [7-9] провели дослідження екологічних параметрів роботи двопаливного двигуна в режимі навантаження, та встановили, що із збільшенням навантаження викидів NOx та CO₂ зростають, а оксид азоту і непрозорість диму мають тенденцію до зниження з 14,3 до 18,2% і 21,4% 36,5-63,7% відповідно. Більше того, у роботах [10-12] спостерігається незначне погіршення робочих характеристик дизельних двигунів, які працюють на газовому паливі, біогазі, стисненому природному газі та водні в діапазоні 2,1-8,84% для термічної ефективності гальмування, та [13-15] 3,1-7,3% для питомого споживання енергії гальмуванням.

У дослідженнях [16-18] встановлено, що дизельні двигуни у двопаливному режимі можуть ефективно працювати на різних видах газоподібного палива, включно з традиційними видами палива, такими як LPG, CNG і сірий водень, а також відновлювані види палива, такі як Bio-CNG, зелений водень, промисловий газ і синтетичний газ в комбінації з дизельним паливом, суттєво не погіршуючи техніко-експлуатаційні та екологічні показники роботи ДВЗ. Дослідження [19-21] показує, що використання біогазу як альтернативного палива в двопаливному двигуні призводить до погіршення на 5-27% параметрів продуктивності, тоді як споживання палива для гальмування збільшується на 33%. Подальше дослідження викидів [22, 23] показує зниження оксидів азоту та викидів диму на 25-65%. Двопаливний двигун продемонстрував збільшення викидів вуглеводнів і CO на 31% порівняно зі звичайним дизельним двигуном.

Дослідження енергетичних показників біогазу та ефективності його використання на двигунах з іскровим запалюванням проведено науковцями [24-26]. Результати дослідження вказують, що під час роботи ДВЗ на біогазі відбувається зниження викидів вуглеводнів та CO₂ у порівнянні з роботою на бензині. Також виявлено, що при роботі на біогазі пікова вихідна потужність двигуна зменшується, але за допомогою електронного блоку керування її можна відкоригувати у бік збільшення.

Підсумовуючи дослідження, робимо висновок, що біогаз став перспективним альтернативним паливом для дизельних двигунів завдяки своїй екологічності та потенціалу до зменшення викидів. Хоча існують певні компроміси щодо параметрів продуктивності, зменшення шкідливих викидів робить його життєздатним варіантом для майбутніх досліджень і

Таблиця 1 – Основні фізико-хімічні показники дизельного палива гідно із ДСТУ 7688:2015 та біодизельного палива RME B100

Назва показника	Одиниці вимірювання	Значення для дизельного палива	Значення для SME B20	Значення для SME B40
Хімічний склад:	%			
С		87	84,96	82,7
Н		12,6	12,45	12,3
О		0,4	2,59	4,73
Вміст сірки	%	0,005	0,00105	0,00208
Нижча теплота згорання	МДж/кг	42,5	41,18	39,89
Цетанове число	-	51	48,68	49,37
Густина за температури 323 К	кг/м ³	820-845	841	852
Тиск насичених парів за температури 481 К	бар	-	0,04091	0,03317
Молекулярна маса	кг/кмоль	-	211,5	232,5

розробок. Отже, питання дослідження екологічних показників роботи ДВЗ на біогазовому паливі є досить актуальним, а його вирішення забезпечить максимально ефективно та екологічне спалювання біогазу на ДВЗ.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Більша частина науковців у своїх працях акцентує увагу на дослідженнях можливості використання біогазу в двопаливних системах живлення дизельних двигунів та у системах живлення одноциліндрових стендових бензинових двигунів за умови зміни міри стиску ДВЗ тощо.

Оскільки використання біогазового палива на двигунах із двопаливними дизельними системами живлення є досить перспективним, то питання дослідження викидів двопаливного дизельного двигуна у процесі роботи на біодизельному паливі та біогазі є досить актуальним та на даний час мало досліджене. Особливо зростає актуальність питання досліджень через високу токсичність дизельного двигуна у процесі використання товарних дизельних палив.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи полягає в теоретичних та експериментальних дослідженнях екологічних показників роботи дизельних двигунів у двопаливному режимі на біогазі та біодизельному паливі у процесі використання даних паливних сумішах на дизельному двигуні Д21А1.

До основних завдань відносяться дослідження екологічних показників роботи двигуна Д21А1 у процесі експлуатації на біогазовому паливі та біодизелі на різних експлуатаційних режимах.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Дослідження будуть проведені на експериментальній установці, що містить базовий двигун Д21А1 з двопаливною системою живлення.

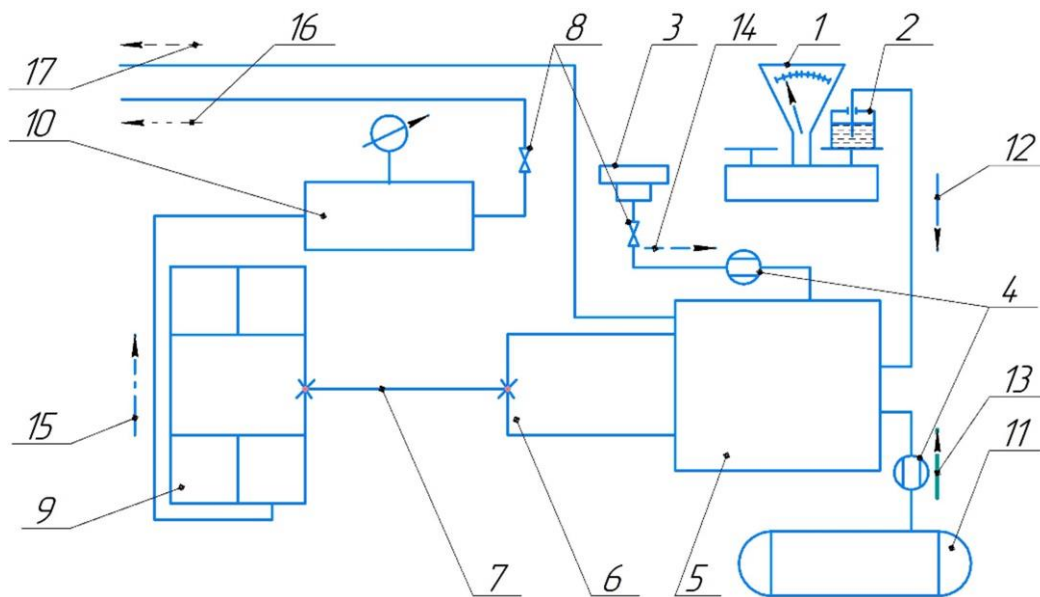
Біогаз, що використовувався в дослідженнях, вироблений компанією Goodvalley Ukraine. Завод з виробництва біогазу із органічних відходів розташований біля ферми у с. Копанки Івано-Франківської обл. (Україна). Склад та властивості біогазового палива за даними компанії Goodvalley Ukraine наведені у табл. 2.

Розроблена експериментальна установка містить дизельний двигун Д21А1 із пристроєм змінного навантаження. Дизельний чотиритактний двоциліндровий двигун Д21А1 з повітряним охолодженням номінальною потужністю 18 кВт, що працює в двопаливному режимі за газодизельним циклом. Частота обертання колінчастого валу двигуна змінюється в межах 600–1800 хв⁻¹. Для забезпечення зміни режимів роботи двигуна дослідна установка укомплектована допоміжним навантажувальним пристроєм – компресором моделі К-5М. Установка також обладнана допоміжними пристроями для забезпечення її функціонування (система запуску, зчеплення, коробка передач) та комплектом реєстраційних і вимірювальних приладів (манометри, термометри, частотомір, газовий лічильник та витратомір палива). Схема розробленої установки наведена на рис. 1.

Біодизельне пальне, що використовується для займання біогазу, до двигуна 5 надходить через трубопровід з паливної ємності 2, що розташований на витратомірі масової витрати палива 1.

Таблиця 2 – Склад та властивості біогазового палива за даними компанії Goodvalley Ukraine

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення параметра
Хімічний склад:	%, об.	
CH ₄		55
CO ₂		35
N ₂	10	
Густина палива за температури T=323 К	кг/м ³	1,211
Молекулярна маса	кг/кмоль	27,03
Теплоємність палива за температури форсунки T=333.15 К	Дж/(кг · К)	1484
Нижча теплота згоряння	МДж/кг	24,63



1 - вага аналітична; 2 - ємність для палива; 3 - фільтр повітряний; 4 - газовий лічильник; 5 - двигун дизельний; 6 - коробка передач; 7 - карданна передача; 8 - вентиль; 9 - компресор; 10 - ресивер; 11 - балон для подачі біогазу; 12 - напрямок руху палива в систему живлення; 13 - напрямок руху подачі біогазу; 14 - напрямок руху подачі повітря; 15 - рух повітря до ресивера; 16 - рух повітря в навколишнє середовище; 17 - рух відпрацьованих газів в навколишнє середовище

Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для дослідження екологічних показників роботи дизельного двигуна Д21А1 у двопаливному режимі роботи за газодизельним циклом

Біогаз до двигуна подається з балону 11 через газовий лічильник до впускного трубопроводу, де змонтована газобалонна апаратура 3-го покоління.

Повітря в двигун надходить через повітряний фільтр 3 і газовий лічильник 4. Система запуску двигуна в конструкції установки містить електростартер. Частота обертання колінчастого валу двигуна вимірювалася механічним переносним тахометром ТЧ10-Р. Прогрів двигуна контролювали за допомогою вимірювання температури моторної оливи датчиком температури двигуна.

Крутний момент від колінчастого валу дизеля 5 через зчеплення і чотириступінчасту коробку передач 6, карданну передачу 7 переда-

ється на вал компресора 9. Стиснуте компресором 9 повітря в трубопроводі стабілізується у ресивері 10, тиск в якому вимірюється манометром. Регулювання тиску здійснюється за допомогою вентиля 8. Температуру повітря вимірювали ртутним термометром з похибкою $\pm 0,5$ °С.

Потужність, яку розвиває двигун, визначали за роботою, що виконана компресором L , для створення абсолютного тиску p_2 [27], Дж/год:

$$L = \frac{L_T}{\eta_K} = \frac{n}{(n-1) \cdot \eta_K} \cdot p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \quad (1)$$

Таблиця 3 – Коротка технічна характеристика газоаналізатора АВТОТЕСТ-02.03П

Назва параметра	Діапазон вимірювання	Ціна поділок	Ділянка діапазону вимірювань	Основна похибка	
				абсолютна	відносна
1. Вимірювані компоненти:					
СН	0...2000 млн ⁻¹	1 млн ⁻¹	0...200 млн ⁻¹ 200...2000 млн ⁻¹	± 10 млн ⁻¹	± 5 %
СО	0...5 %	0,01%	0...1 % 1...5 %	± 0,03 %	± 3 %
СО ₂	0...16 %	0,01 %	0...12,5 % 12,5...16 %	± 0,5 %	± 4 %
О ₂	0...21 %	0,1 %	0...3,3 % 3,3...21 %	± 0,1 %	± 3 %
NO _x	0...5000 млн ⁻¹	10 млн ⁻¹	0...1000 млн ⁻¹ 1000...5000 млн ⁻¹	± 50 млн ⁻¹	± 5 %
2. Температура	20...125 °С	1 °С	20...125 °С	± 2,0 °С	-

де η_k – ККД компресора;
 n – показник політропи стиску;
 V_1 – подача компресора за параметрів T_1 ,
 p_1 , м³/год;
 p_1 – абсолютний тиск повітря на вході в компресор, МПа;
 p_2 – абсолютний тиск повітря на виході з компресора, МПа.

Показник політропи стиску в компресорі n визначали із співвідношення [27]:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n}{n-1}}, \quad (2)$$

де T_1 і T_2 – абсолютна температура повітря відповідно на вході та на виході із компресора, К.

Потужність привода компресора $N_{дв}$ обчислювали за формулою [27], кВт:

$$N_{дв} = \frac{L_1}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3}, \quad (3)$$

де $\eta_1=0,98$; $\eta_2=0,99$; $\eta_3=0,71$ – ККД відповідно коробки передач, карданної передачі та поршневого двоступінчастого компресора [27].

Токсичність відпрацьованих газів досліджували автомобільним газоаналізатором АВТОТЕСТ-02.03П, коротка технічна характеристика якого наведена у табл. 3 за умов прогріву двигуна до робочої температури, близької до 80 °С.

Коефіцієнт надлишку повітря (α) визначали, як відношення дійсно витраченої кількості повітря до теоретично необхідної (стехіометричної):

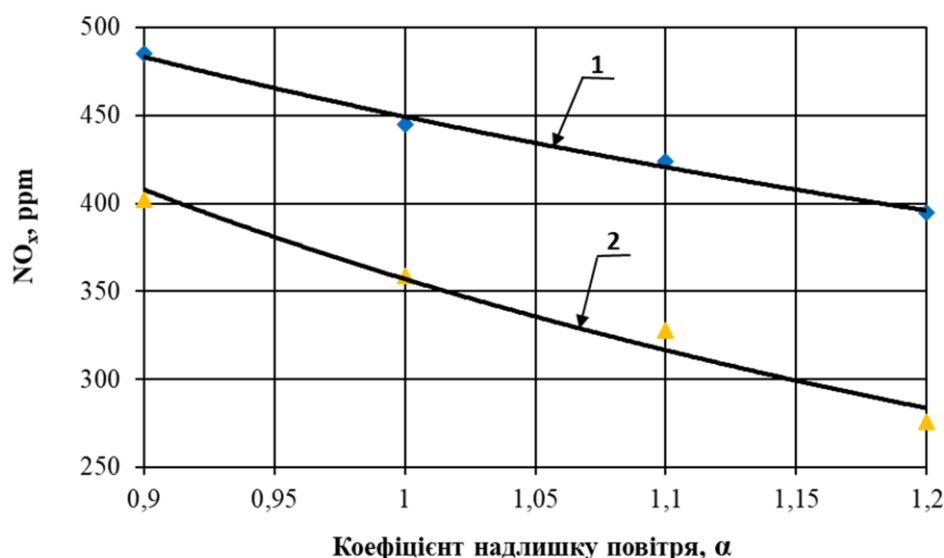
$$\alpha = \frac{L_{diuch.}}{L_0}. \quad (4)$$

Нами досліджувалося три основні режими паливної суміші за коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha=1$) суміш нормальна, а також ($\alpha>1$) суміш збіднена та ($\alpha<1$) збагачена. Режим встановлювався за допомогою вентиля 8, що розміщений за повітряним фільтром 3.

Кількість біодизельного палива та кут випередження запалювання (момент впорскування пального) встановлювали механічним способом шляхом виконання відповідних налаштувань ПНВТ.

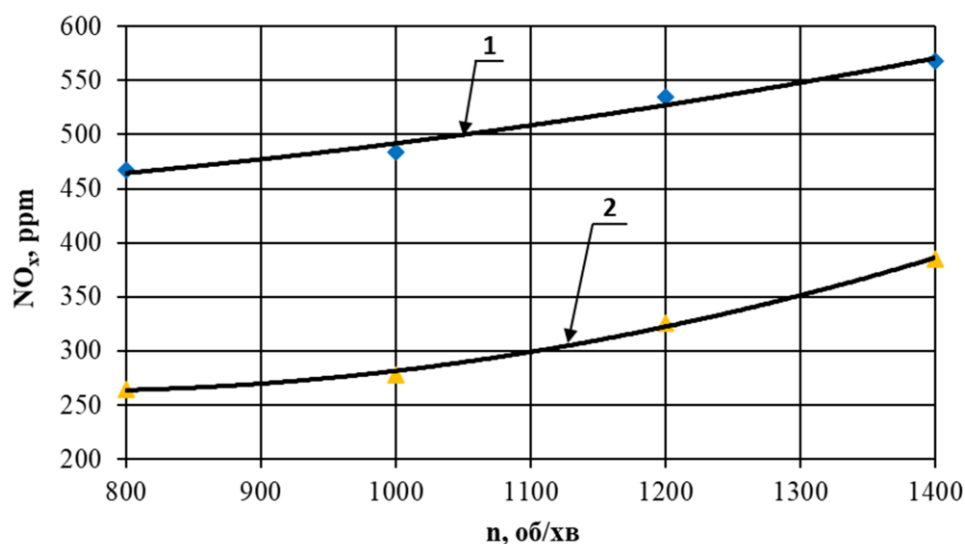
За результатами проведених досліджень викидів NO_x дизельного двигуна Д21А1 при роботі на двопаливному режимі із живленням біогазом було отримано ряд характеристик, що відображені у вигляді рис. 2-5. Залежність викидів NO_x дизельного двигуна Д21А1 при роботі на двопаливному режимі в залежності від коефіцієнта надлишку повітря відображено на рис. 2.

Дослідження рис. 2 проводили пі час роботи двигуна на товарному дизельному паливі та за газодизельним циклом із застосуванням біогазу. З метою контролю впливу коефіцієнта надлишку повітря на екологічні параметри роботи двигуна Д21А1 забезпечували його зміну в діапазоні від 0,9 до 1,2 поворотом вентиля 8 (рис. 1). За результатами досліджень нами встановлено, що із зростанням коефіцієнта надлишку повітря відбувається зниження викидів NO_x на 18,6 % при застосуванні дизельного палива та 31,3 % – при використанні біогазового палива. Також у ході досліджень нами встановлено (рис. 2), що викиди NO_x дизельного двигуна Д21А1 при його роботі за газодизельним циклом нижчі в середньому на 21,9 % у порівнянні з викидами на дизельному паливі.



1 – робота двигуна Д21А1 на дизельному паливі; 2 – робота двигуна Д21А1 у газодизельному циклі

Рисунок 2 – Зміна концентрації NO_x у відпрацьованих газах двигуна Д21А1 залежно від коефіцієнта надлишку повітря, α



1 – робота двигуна Д21А1 на дизельному паливі; 2 – робота двигуна Д21А1 у газодизельному циклі

Рисунок 3 – Зміна концентрації NO_x у відпрацьованих газах двигуна Д21А1 за зміни частоти обертання колінчастого валу, n

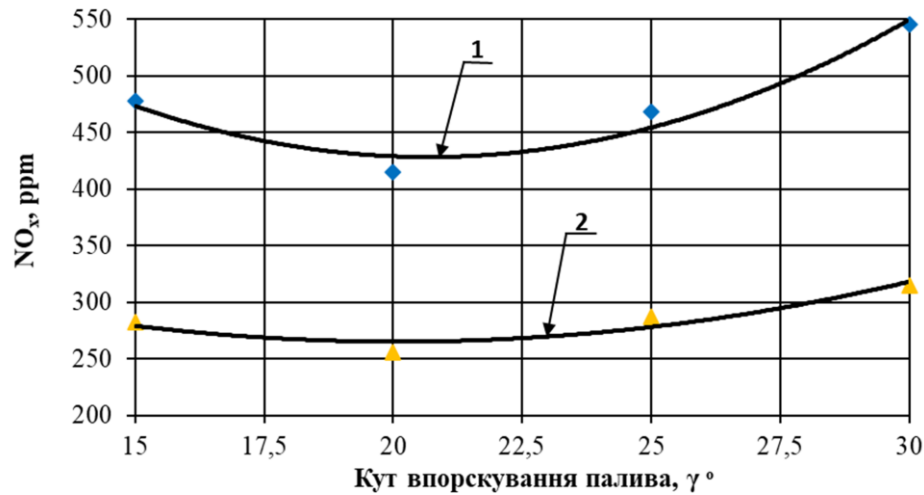
Результати дослідження викидів NO_x дизельного двигуна Д21А1 при роботі на двопаливному режимі в залежності від частоти обертання колінчастого валу графічно відображено на рис. 3.

Нами встановлено, що із зростанням частоти обертання колінчастого валу в діапазоні з 800 до 1400 об/хв відбувається зростання викидів NO_x на 9 % при застосуванні дизельного палива та 15,5% – при використанні біогазового палива.

Дослідження викидів NO_x дизельного двигуна Д21А1 при роботі на двопаливному ре-

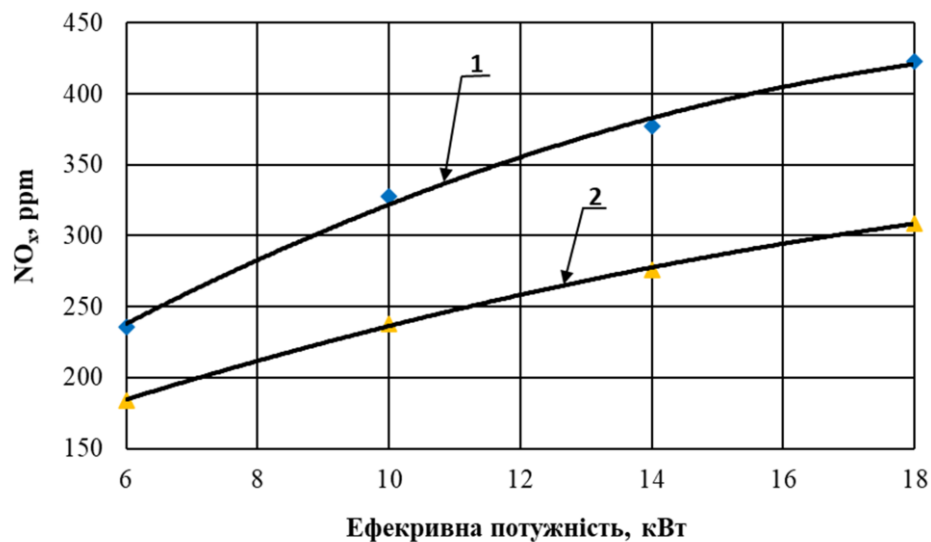
жимі залежно від кута випередження впорскування палива графічно відображено на рис. 4.

Результати відображені на рис. 4 вказують на зниження викидів NO_x за зміни кута випередження впорскування від 15 до 20° на 13,2 % при застосуванні дизельного палива та 9,2 % - при використанні біогазового палива. Подальші дослідження встановили, що за зростання кута випередження впорскування від 20 до 30° викиди NO_x зростають на 14,1 % при застосуванні дизельного палива та 8,9 % – при використанні біогазового палива, а отже, за даним



1 – робота двигуна Д21А1 на дизельному паливі; 2 – робота двигуна Д21А1 у газодизельному циклі

Рисунок 4 – Зміна концентрації NO_x у відпрацьованих газах двигуна Д21А1 залежно від кута випередження впорскування палива, γ



1 – робота двигуна Д21А1 на дизельному паливі; 2 – робота двигуна Д21А1 у газодизельному циклі

Рисунок 5 – Зміна концентрації NO_x у відпрацьованих газах двигуна Д21А1 залежно від ефективної потужності двигуна, N_e

показником оптимальний режим випередження впорскування палива – 20°.

Викиди NO_x дизельного двигуна Д21А1 при роботі на двопаливному режимі в залежності від ефективної потужності двигуна відображено на рис. 5.

З результатів досліджень рис. 5 встановлено, що із зростанням навантаження на двигун в діапазоні з 6 до 18 кВт відбувається зростання викидів NO_x на 44,2 % при застосуванні дизельного палива та 40,4 % при використанні біогазового палива. Проте можна відзначити, що викиди двигуна Д21А1 у процесі роботи на двопаливному режимі при навантаженні нижчі

на 26,2 % у порівнянні з роботою на дизельному паливі, це пояснюється нижчою температурою в циліндрах двигуна при роботі на біогазовому паливі.

Висновки

З результатів досліджень нами встановлено, що значний вплив на викиди NO_x двигуна Д21А1 має коефіцієнт надлишку повітря α. Найкращі ефективні показники забезпечуються на цьому режимі при α=1,2. При збільшенні α від 0,9 до 1,2 вміст, наприклад, оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах зменшується на 18,6 % при застосуванні дизельного палива та

31,3 % – при використанні біогазового палива. Також, у процесі досліджень нами встановлено, що викиди NO_x дизельного двигуна Д21А1 при його роботі за газодизельним циклом нижчі в середньому на 21,9% у порівнянні з викидами на дизельному паливі.

Необхідно зазначити, що значний вплив на викиди NO_x має також кут випередження впорскування палива, так за зміни кута випередження впорскування від 15 до 20° на 13,2 % при застосуванні дизельного палива та 9,2 % – при використанні біогазового палива. Подальшими дослідженнями встановили, що за зростання кута випередження впорскування від 20 до 30° викиди NO_x зростають на 14,1 % при застосуванні дизельного палива та 8,9 % при використанні біогазового палива, а отже, за даним показником оптимальний режим випередження впорскування палива – 20°.

За результатами дослідження зміни токсичності двигуна Д21А1 в залежності від навантаження встановлено, що із зростанням навантаження на двигун в діапазоні з 6 до 18 кВт відбувається зростання викидів NO_x на 44,2 %

при застосуванні дизельного палива та 40,4 % при використанні біогазового палива. Проте можна відзначити, що викиди двигуна Д21А1 у процесі роботи на двопаливному режимі при навантаженні нижчі на 26,2 % у порівнянні з роботою на дизельному паливі.

Отже, оптимізація робочого процесу дизельного двигуна за рахунок застосування газодизельного циклу забезпечує підвищення його екологічних показників. Це дає можливість ефективно застосовувати біогазове паливо за мінімальних конструктивних змін, оскільки вимагає лише монтаж системи ГБО та налаштування системи живлення на мінімальну подачу дизельного палива.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Khayum N., Anbarasu S., Murugan S. Combined effect of fuel injecting timing and nozzle opening pressure of a biogas-biodiesel fuelled diesel engine. *Fuel*. 2020. Vol. 262. P. 116505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116505>.
2. Khayum N., Anbarasu S., Murugan S. Effect of nozzle opening pressure on combustion, performance, and emission analyses of a dual fuel diesel engine. *Energy Sources*. 2020. Vol. 158. P. 1780349. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1780349>.
3. Bhaskor J. B., Ujjwal K. S. Experimental evaluation of a rice bran biodiesel – biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios. *Renewable Energy*. 2016. Vol. 87. P. 782–790. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.002>.
4. Feroskhan M., Ismail S. Evaluating the effect of intake parameters on the performance of a biogas–diesel dual-fuel engine using the Taguchi method. *Biofuels*. 2020. Vol. 11. P. 441–449. DOI: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1370885>.
5. Khan O., Alsaduni I., Equbal A., Parvez M., Kumar Yadav A. Performance and emission analysis of biodiesel blends enriched with biohydrogen and biogas in internal combustion engines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 183. P. 1013–1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.049>.
6. Khayum N., Anbarasu S., Murugan S. Optimization of fuel injection parameters and compression ratio of a biogas fueled diesel engine using methyl esters of waste cooking oil as a pilot fuel. *Energy*. 2021. Vol. 221. P. 119865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119865>.
7. Zafar S., Prabhakar S., Bhaskor J. B., Van Nhanh N., Thi Anh E. B., Dinh Tuyen N. et al. Modeling-optimization of performance and emission characteristics of dual-fuel engine powered with pilot diesel and agricultural-food waste-derived biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. P. 6761–6777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.150>.
8. Van Nhanh N., Swarup Kumar N., Le H. S., Kowalski J., Deepanraj B., Duong X. Q. et al. Performance and emission characteristics of diesel engines running on gaseous fuels in dual-fuel mode. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 49. P. 868–909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.130>.

9. Bembenek M., Karwat B., Melnyk V., Mosora Y. Research on the Impact of Supplying the Air-Cooled D21A1 Engine with RME B100 Biodiesel on Its Operating Parameters. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 6430. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16186430>.
10. Leykun M. G., Mekonen M. W. Investigation of the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Biogas-Diesel Dual Fuel. *Fuels*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 15–30. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels3010002>.
11. Kumar P., Subbarao M. V., Vijay V. K., Khan S. A., Amit Sharma, Kala L. D. Performance assessment of compression ignition engines powered by biogas, biodiesel, and producer gas mix derived from agriculture waste. *Biofuels*. 2023. Vol. 14. P. 921–931. DOI: <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2190574>.
12. Bembenek M., Melnyk V., Mosora Y. Study of Parameters of the Mixture and Heat Generation of the DD15 Diesel Engine of the Sandvik LH514 Loader in the Process of Using Alternative Fuels Based on RME. *Acta Mechanica et Automatica*. 2024. Vol. 18, No. 2. P. 169–176. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0021>.
13. Vijin Prabhu A., Avinash A., Brindhadevi K., Pugazhendhi A. Performance and emission evaluation of dual fuel CI engine using preheated biogas-air mixture. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 754. P. 142389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142389>.
14. Kryshtopa S., Kryshtopa L., Panchuk M., Smigins R., Dolishnii B. Composition and Energy Value Research of Pyrolyse Gases. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021. Vol. 628. P. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/628/1/012008>.
15. Mohite A., Bora B. J., Sharma P., Saridemir S., Mallick D., Sunil S., Ağbulut Ü. Performance enhancement and emission control through adjustment of operating parameters of a biogas-biodiesel dual fuel diesel engine: An experimental and statistical study with biogas as a hydrogen carrier. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. P. 752–764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.201>.
16. Mateichyk V., Kryshtopa S., Kryshtopa L., Smieszek M., Kostian N. Research of Energy Efficiency and Environmental Performance of Vehicle Power Plant Converted to Work on Alternative Fuels. *Machines*. 2024. Vol. 12, No. 5. P. 285. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12050285>.
17. Dubey A., Prasad R. S., Singh J. K., Nayyar A. Combined effects of biodiesel – ULSD blends and EGR on performance and emissions of diesel engine using Response surface methodology (RSM). *Energy Nexus*. 2022. Vol. 7. P. 100136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100136>.
18. Dubey A., Prasad R. S., Singh J. K., Nayyar A. Optimization of diesel engine performance and emissions with biodiesel-diesel blends and EGR using response surface methodology (RSM). *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 8. P. 100509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100509>.
19. Sahu P. K., Sharma S. Multiple objective optimization of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using response surface methodology. *Mater Today Proc.* 2022. Vol. 52, No. 3. P. 2065–2072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.206>.
20. Khoobbakht G., Najafi G., Karimi M., Akram A. Optimization of operating factors and blended levels of diesel, biodiesel and ethanol fuels to minimize exhaust emissions of diesel engine using response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 1006–1017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.143>.
21. Ahmad A., Yadav A. K., Hasan S. Biogas as a sustainable and viable alternative fuel for diesel engines: A comprehensive review of production, purification, economic analysis and performance evaluation. *Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 0, No. 0. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544089241255930>.
22. Patrick T. S., Engelbrecht N., Stephanus P., Bessarabov P. D. Thermophilic Biogas Upgrading via ex Situ Addition of H₂ and CO₂ Using Codigested Feedstocks of Cow Manure and the Organic Fraction of Solid Municipal Waste. *ACS Omega*. 2020. Vol. 5. P. 17367–17376. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01725>.
23. Ahmad A., Yadav A. K., Singh A. Process optimization of spirulina microalgae biodiesel synthesis using RSM coupled GA technique: a performance study of a biogas-powered dual-fuel engine. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 21, No. 14. P. 1128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04948-z>.

24. Guillermo J., Cacho L., Oliveros A., Barrera J. Development of a Biogas Fuel Supply System for an Internal Combustion Engine. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*. 2011. Vol. 26. P. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.2631>.

25. Prashant S., Yadav S. D. Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*. 2013. Vol. 12. P. 740–743. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533476>.

26. Suslov D. Y., Ramazanov R. S. The study of energy performance of biogas from agricultural waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 552. P. 012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012032>.

27. BOSCH Automotive Handbook / Robert Bosch GmbH. Robert Bosch, 2022. 2044 p. ISBN: 978-1-119-91191-3.

References

1. Khayum, N., Anbarasu, S., & Murugan, S. (2020). Combined effect of fuel injecting timing and nozzle opening pressure of a biogas-biodiesel fuelled diesel engine. *Fuel*, 262, Article 116505. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116505>

2. Khayum, N., Anbarasu, S., & Murugan, S. (2020). Effect of nozzle opening pressure on combustion, performance, and emission analyses of a dual fuel diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(18), 2266–2279. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1780349>

3. Bhaskor, J. B., & Ujjwal, K. S. (2016). Experimental evaluation of a rice bran biodiesel – biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios. *Renewable Energy*, 87, 782–790. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.002>

4. Feroskhan, M., & Ismail, S. (2020). Evaluating the effect of intake parameters on the performance of a biogas–diesel dual-fuel engine using the Taguchi method. *Biofuels*, 11(4), 441–449. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1370885>

5. Khan, O., Alsaduni, I., Eqbal, A., Parvez, M., & Kumar Yadav, A. (2024). Performance and emission analysis of biodiesel blends enriched with biohydrogen and biogas in internal combustion engines. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 1013–1037. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.049>

6. Khayum, N., Anbarasu, S., & Murugan, S. (2021). Optimization of fuel injection parameters and compression ratio of a biogas fueled diesel engine using methyl esters of waste cooking oil as a pilot fuel. *Energy*, 221, Article 119865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119865>

7. Zafar, S., Prabhakar, S., Bhaskor, J. B., Van Nhanh, N., Thi Anh, E. B., & Dinh Tuyen, N. (2023). Modeling-optimization of performance and emission characteristics of dual-fuel engine powered with pilot diesel and agricultural-food waste-derived biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(19), 6761–6777. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.150>

8. Van Nhanh, N., Swarup Kumar, N., Le, H. S., Kowalski, J., Deepanraj, B., Duong, X. Q., ... & Long, V. D. (2024). Performance and emission characteristics of diesel engines running on gaseous fuels in dual-fuel mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 868–909. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.130>

9. Bembenek, M., Karwat, B., Melnyk, V., & Mosora, Y. (2023). Research on the impact of supplying the air-cooled D21A1 engine with RME B100 biodiesel on its operating parameters. *Energies*, 16(18), Article 6430. <https://doi.org/10.3390/en16186430>

10. Leykun, M. G., & Mekonen, M. W. (2022). Investigation of the performance and emission characteristics of diesel engine fueled with biogas-diesel dual fuel. *Fuels*, 3(1), 15–30. <https://doi.org/10.3390/fuels3010002>

11. Kumar, P., Subbarao, M. V., Vijay, V. K., Khan, S. A., Sharma, A., & Kala, L. D. (2023). Performance assessment of compression ignition engines powered by biogas, biodiesel, and producer gas mix derived from agriculture waste. *Biofuels*, 14(9), 921–931. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2190574>

12. Bembenek, M., Melnyk, V., & Mosora, Y. (2024). Study of parameters of the mixture and heat generation of the DD15 diesel engine of the Sandvik LH514 loader in the process of using alternative fuels based on RME. *Acta Mechanica et Automatica*, 18(2), 169–176. <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0021>

13. Vijin Prabhu, A., Avinash, A., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2021). Performance and emission evaluation of dual fuel CI engine using preheated biogas-air mixture. *Science of The Total Environment*, 754, Article 142389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142389>
14. Kryshtopa, S., Kryshtopa, L., Panchuk, M., Smigins, R., & Dolishnii, B. (2021). Composition and energy value research of pyrolyse gases. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 628, Article 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/628/1/012008>
15. Mohite, A., Bora, B. J., Sharma, P., Saridemir, S., Mallick, D., Sunil, S., & Ağbulut, Ü. (2024). Performance enhancement and emission control through adjustment of operating parameters of a biogas-biodiesel dual fuel diesel engine: An experimental and statistical study with biogas as a hydrogen carrier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 752–764. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.201>
16. Mateichyk, V., Kryshtopa, S., Kryshtopa, L., Smieszek, M., & Kostian, N. (2024). Research of energy efficiency and environmental performance of vehicle power plant converted to work on alternative fuels. *Machines*, 12(5), Article 285. <https://doi.org/10.3390/machines12050285>
17. Dubey, A., Prasad, R. S., Singh, J. K., & Nayyar, A. (2022). Combined effects of biodiesel – ULSD blends and EGR on performance and emissions of diesel engine using response surface methodology (RSM). *Energy Nexus*, 7, Article 100136. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100136>
18. Dubey, A., Prasad, R. S., Singh, J. K., & Nayyar, A. (2022). Optimization of diesel engine performance and emissions with biodiesel-diesel blends and EGR using response surface methodology (RSM). *Cleaner Engineering and Technology*, 8, Article 100509. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100509>
19. Sahu, P. K., & Sharma, S. (2022). Multiple objective optimization of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 52(3), 2065–2072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.206>
20. Khoobakht, G., Najafi, G., Karimi, M., & Akram, A. (2016). Optimization of operating factors and blended levels of diesel, biodiesel and ethanol fuels to minimize exhaust emissions of diesel engine using response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 99, 1006–1017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.143>
21. Ahmad, A., Yadav, A. K., & Hasan, S. (2024). Biogas as a sustainable and viable alternative fuel for diesel engines: A comprehensive review of production, purification, economic analysis and performance evaluation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/09544089241255930>
22. Patrick, T. S., Engelbrecht, N., Stephanus, P., & Bessarabov, D. (2020). Thermophilic biogas upgrading via ex situ addition of H₂ and CO₂ using codigested feedstocks of cow manure and the organic fraction of solid municipal waste. *ACS Omega*, 5(28), 17367–17376. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01725>
23. Ahmad, A., Yadav, A. K., & Singh, A. (2024). Process optimization of spirulina microalgae biodiesel synthesis using RSM coupled GA technique: A performance study of a biogas-powered dual-fuel engine. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21, 11281–11298. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04948-z>
24. Guillermo, J., Cacho, L., Oliveros, A., & Barrera, J. (2011). Development of a biogas fuel supply system for an internal combustion engine. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 26(3), 6–19. <https://doi.org/10.13052/dgaej2156-3306.2631>
25. Prashant, S., & Yadav, S. D. (2013). Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine. In *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)* (pp. 740–743). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533476>
26. Suslov, D. Y., & Ramazanov, R. S. (2019). The study of energy performance of biogas from agricultural waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 552, Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/552/1/012032>
27. Robert Bosch GmbH. (2022). *BOSCH automotive handbook* (11th ed.). Wiley.

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE D21A1 DIESEL ENGINE BY ENSURING ITS OPERATION ON THE GAS-DIESEL CYCLE USING BIOGAS FUEL

Melnyk V. M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>
e-mail: vasyi.melnyk@nung.edu.ua

Няч М. М.

Doctor of Philosophy, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3662-0941>
e-mail: mariia.hnyp@nung.edu.ua

Abstract. The vast majority of gasoline internal combustion engines and some diesel engines are re-equipped to operate on gaseous fuel in order to reduce fuel costs. This, in turn, can create a number of difficulties associated with the low heat of combustion of untreated biogas, the presence of moisture and the toxicity of engines. The problem of low heat of combustion can be solved by cleaning biogas from unwanted components and moisture. To solve the issue of engine toxicity, there is a need to study the main environmental indicators of their operation during operation on biogas fuel. According to the results of our research, we have established that the excess air coefficient α has a significant impact on NO_x emissions of the D21A1 engine. The best effective indicators are provided in this mode at $\alpha=1.2$. With an increase in α from 0.9 to 1.2, the content, for example, of nitrogen oxides NO_x in exhaust gases decreases by 18.6% when using diesel fuel and by 31.3% when using biogas fuel. Also in the course of research we have established that NO_x emissions of the D21A1 diesel engine when operating on the gas-diesel cycle are lower on average by 21.9% compared to emissions on diesel fuel. The fuel injection advance angle also has a significant impact on NO_x emissions. Thus, when the injection advance angle changes from 15 to 20°, emissions decrease by 13.2% when using diesel fuel and by 9.2% when using biogas fuel. The study also established that when the injection advance angle increases from 20 to 30°, NO_x emissions increase by 14.1% when using diesel fuel and by 8.9% when using biogas fuel. Therefore, according to this indicator, the optimal mode is achieved when the fuel injection advance angle increases by 20°. According to the results of the study of the change in toxicity of the D21A1 engine depending on the load, it was found that with an increase in the load on the engine in the range from 6 to 18 kW, the volume of NO_x emissions increases by 44.2% when using diesel fuel and by 40.4% when using biogas fuel. However, it can be noted that the emissions of the D21A1 engine during operation in dual-fuel mode under load are lower by 26.2% compared to operation on diesel fuel.

Keywords: engine, biogas, diesel fuel, technical and operational indicators, load.