

УДК 621.431
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.11](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.11)

MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE SPECIFIC EMISSION OF CO WITH DIESEL GENERATOR EXHAUST GASES WHEN RUNNING ON BIOFUELS.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПИТОМОГО ВИКИДУ CO З ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ПРИ РОБОТІ НА БІОПАЛИВІ

Serhii M. Dotsenko

serhii.dotsenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2913-3790

Alla Y. Lysykh

alla.lysykh@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0979-7736

Ihor A. Kapura

ihor.kapura@nuos.edu.ua
ORCID: 0009-0008-1695-389X

Oleksandr V. Shostak

oleksandr.shostak@nuos.edu.ua
ORCID: 0009-0000-7372-9394

С. М. Доценко,

канд. техн. наук, доцент

А. Ю. Лисих,

канд. техн. наук, доцент

І. А. Капура,

канд. техн. наук, доцент

О. В. Шостак,

старший викладач

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. *Purpose.* The purpose of the experimental research was to build a mathematical model for estimating the specific emission of CO with exhaust gases of the DGA-900 engine-generator when operating on biofuels depending on power. The relevance of the study is due to the need to replace energy resources of petroleum origin, which are mainly imported, with their own biological origin. Simultaneously with the growth of prices for fuel of petroleum origin, the requirements for the level of emissions of harmful substances with diesel exhaust gases are being tightened, which gives advantages to biofuels over diesel. Also, the production of biofuels will contribute to strengthening energy security and economic independence of the state and will provide both economic and environmental effects.

Methodology. To achieve this goal, an experimental study of the operation of the DGA-900 engine-generator on biofuel was carried out. To measure the mass equivalent of CO emissions with exhaust gases, a certified Testo 350 device was used. The load characteristic was removed in three operating modes, corresponding to 50% (450 kW), 75% (675 kW) and 100% (900 kW) of the load from the rated power of the diesel generator.

Results. As a result of the test, quantitative indicators of toxic CO emissions in exhaust gases were obtained. The dependence of the concentration of carbon monoxide CO on the coefficient of excess air and the operating mode of the diesel engine were determined. The analysis of the parameters of the diesel engine when operating on diesel fuel and biofuel indicates that such parameters of the working process as the maximum combustion pressure and the temperature of the exhaust gases at the outlet of the cylinders are almost the same. The mathematical analysis and processing of the results of the experimental study, obtained during the removal of the load characteristic, made it possible to obtain mathematical dependencies that adequately reflect the nature of changes in emissions of toxic substances depending on the load.

Scientific novelty. A linear mathematical model has been constructed to estimate the mass equivalent of CO emissions with exhaust gases of the DGA-900 engine-generator when operating on biofuels depending on the load.

Practical significance. The obtained results create a scientific and methodological basis for further studies of mass equivalents of toxic emissions with diesel engine exhaust gases when working on biofuels using a nonlinear regression equation.

Key words: diesel engine; mathematical model; biofuels; emissions of toxic substances; carbon monoxide; soybean oil.

Анотація. *Мета.* Метою експериментальних досліджень було побудова математичної моделі для оцінювання питомого викиду CO з випускними газами двигун-генератора ДГА-900 при роботі на біопаливі в залежності від потужності. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю заміни енергоресурсів нафтового походження, які переважно імпортуються, на власне біологічного походження. Одночасно з ростом цін на паливо нафтового походження посилюються вимоги до рівня викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами дизелів, що надає переваги біопаливу перед дизельним. Також власне виробництво біопалива сприятиме зміцненню енергетичної безпеки та економічної незалежності держави і забезпечить як економічний, так і екологічний ефект.

Методика. Для досягнення мети було проведено експериментальне дослідження роботи на біопаливі двигун-генератора ДГА-900. Для вимірювання масового еквівалента викидів CO з випускними газами було задіяно сертифікований прилад Testo 350. Зняття навантажувальної характеристики здійснено на трьох режимах роботи, що відповідають 50% (450 кВт), 75% (675 кВт) та 100% (900 кВт) навантаження від номінальної потужності дизель-генератора.

Результати. В результаті випробування були отримані кількісні показники токсичних викидів CO у відпрацьованих газах. Були визначені залежності концентрації оксиду вуглецю CO від коефіцієнту надлишку повітря та режиму роботи дизельного двигуна. Аналіз параметрів роботи дизеля при роботі на дизельному паливі та біопаливі свідчить про те, що такі параметри робочого процесу як максимальний тиск згоряння та температура випускних газів на виході із циліндрів практично співпадають. Проведені математичний аналіз та обробка результатів експериментального дослідження, одержані в ході зняття навантажувальної характеристики, дозволили отримати математичні залежності, які адекватно відображають характер зміни викидів токсичних речовин в залежності від навантаження.

Наукова новизна. Побудована лінійна математична модель для оцінювання масового еквівалента викидів CO з випускними газами двигун-генератора ДГА-900 при роботі на біопаливі в залежності від навантаження.

Практична значимість. Отримані результати створюють науково-методичну основу для подальших досліджень масових еквівалентів токсичних викидів з випускними газами дизельного двигуна при роботі на біопаливі з використанням нелінійного регресійного рівняння.

Ключові слова: дизельний двигун; математична модель; біопаливо; викиди токсичних речовин; угарний газ; соєва олія.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Під час проведення випробувань дизель-генератор працював в паралель із промисловою електромережою. В ході дослідження визначався масовий еквівалент шкідливих речовин у випускних газах.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Біодизельне паливо виробляється у всьому світі та включає в себе різноманітні види сировини. Для Бразилії та США це соя, для Європи це рапс. Соя, як сировина складає 70% бразильського біодизеля, при цьому має найбільш конкурентну ціну в порівнянні з іншою сировиною [1, 2].

Дослідження роботи двигуна на біопаливі показали, що масовий еквівалент шкідливих речовин у випускних газах безпосередньо залежить від сировини з якої воно виготовлено. В цілому біодизель з більш високим змістом насичених жирних кислот має більш високе цетанове число, що може вплинути на роботу двигуна за рахунок зменшення періоду затримки самозаймання біопалива [3, 4].

Дослідження з визначення вмісту шкідливих речовин проводилися в лабораторії хімії та мікрогенерації електроенергії (2023 рік) Державного університету Західної Парани (UNIOESTE, Каскавел і Толедо, Парана, Бразилія). В якості палива для генераторного дизеля потужністю 3 кВт використовувалися бабасу (пальмова олія), соєва олія та дизельне паливо.

Вимірювальні параметри включали питому витрату палива, температуру випускних газів, оксиди азоту (NO_x), вуглеводні (CH) та угарний газ (CO). Результати показали, що для бабасу викиди NO_x знизилися на всіх режимах навантаження в порівнянні з біодизелем який працює на соєвій олії. В той же час біодизель на соєвій олії демонстрував менші викиди (CH) та (CO).

Таким чином, біодизель на соєвій олії може бути використаний в якості альтернативи дизельному двигуну [5].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Математичні моделі для розрахунку викидів токсичних речовин з дизельним двигуном були розроблені в Харківському національному автомобільно – дорожньому університеті. Дана математична модель призначена для розрахунку кількості шкідливих речовин, ($г/км$), при русі автобуса з різними експлуатаційними режимами, залежно від швидкості руху, ваги автобуса та сумарного дорожнього опору. Також в дизельному двигуні використовується стандартне дизельне паливо [6].

В даному випадку ми розглядаємо стаціонарний дизель-генератор ДГА-900, який працює на соєвій олії та забезпечує електричною енергією промислового споживача. Тому для оцінювання токсичних викидів CO з випускними газами дизель-генератора ДГА-900

при роботі на соєвій олії, в залежності від потужності дизель-генератора, нам і потрібно побудувати математичну модель, яка на даний момент не розроблена.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою експериментальних досліджень було зняття навантажувальної характеристики дизельного двигуна, та побудова математичної моделі для оцінювання питомого викиду CO з випускними газами.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження з визначення характеристик дизельного двигуна, проводилися на дизелі 6 ЧН 26/34, який працює в складі установки ДГА-900. Вміст токсичних речовин у відпрацьованих газах визначався газоаналізатором Testo 350.

Об'єктом експериментального дослідження був шестициліндровий чотиритактний середньо обертовий дизельний двигун з наддувом (260 – діаметр циліндра, мм; 340 – хід поршня, мм) з безпосереднім вприскуванням палива в циліндр, газотурбінним наддувом і проміжним охолодженням надувного повітря.

Предметом дослідження є процеси, що відбуваються в циліндрі поршневого дизельного двигуна при роботі на біопаливі в залежності від навантаження.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Основним видом моторного палива на даний момент залишається рідке паливо, отримане в результаті видобутку та переробки нафти. Але, якщо врахувати, що з кожним роком вичерпні запаси нафти зменшуються, то наслідком цього є поступове збільшення не лише собівартості самого палива, але й енергії отриманої з нього. Необхідно відмітити, що використання моторного палива отриманого з нафти, шляхом його спалювання супроводжується викидом в атмосферу великої кількості токсичних речовин.

Серед них окремо треба виділити такі токсичні викиди як CO , SO_2 , NOx та різні форми вуглеводнів, що не пройшли стадію повного окислення. Крім того, у відпрацьованих газах двигуна, працюючого на рідкому моторному паливі, міститься значний відсоток CO_2 , який потрапляючи в атмосферу сприяє збільшенню парникового ефекту [7].

Постановою *Верховної Ради України* від 16 липня 2024 року за № 3864-IX «Прийнято за основу проект Закону України про внесення змін до Податкового кодексу України щодо встановлення ставки нуль гривень екологічного податку за викиди двоокису вуглецю для установок, якими здійснюються такі викиди в результаті спалювання біопалива».

Законопроектом передбачається внесення змін до Податкового кодексу України та встановлення ставки нуль гривень екологічного податку за викиди двоокису вуглецю, що утворюються при спалюванні біопалива установками, які використовують біопаливо як єдиний вид палива та, які внесені до реєстру установок. Даним законопроектом передбачається розвиток та

підтримка відновлювальної енергетики з урахуванням принципів економічної доцільності та охорони навколишнього середовища, а також альтернативних видів палива, зокрема стале виробництво біопалива і співробітництво у сфері нормативно-правових питань, сертифікації та стандартизації, а також технологічного і комерційного розвитку. У рамках статей закону передбачено поступове наближення законодавства України до права та політики ЄС у сфері охорони навколишнього природного середовища [8].

Даний законопроект, відповідно до положень Додатку IV до Директиви 2003/87/ЄС, підтверджує, що коефіцієнт викидів парникових газів для біомаси дорівнює нулю і тому викиди двоокису вуглецю від спалювання біомаси не враховуються, так як біопаливо вважається CO_2 – нейтральним паливом. Прийняття розроблених законопроектів сприятиме усуненню бар'єрів у залученні інвесторів до встановлення установок на біопаливі та стимулюванню впровадження біоенергетичних проектів.

Враховуючи вище викладене можна зробити висновок, що дослідження спрямовані на оцінювання викидів шкідливих речовин при роботі дизельних двигунів на біопаливі, утилізацію тепла перспективні та актуальні і можуть бути використанні для подальшої конвертації дизельних та газодизельних двигунів для роботи на біопаливі [9,10].

В даній статті представлені результати експериментальних досліджень щодо визначення екологічних показників під час роботи дизельного поршневого двигуна з наддувом (6 ЧН 26/34) на соєвій олії. Силова установка ДГА-900 призначена для локального резервного забезпечення промислового споживача електричною енергією.

Крім техніко-економічних показників під час даного випробування були визначені кількісні показники викидів відпрацьованих газів [10].

Метою випробування було визначення величини викидів шкідливих компонентів у вихлопних газах дизельного двигуна при роботі дизель-генератора на соєвій олії. Параметри ДГУ-900 вимірювалися при режимах, відповідних 50, 75 і 100% від номінальної потужності дизель-генератора [10].

РЕЗУЛЬТАТИ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Було отримано наступні результати замірів викидів CO з випускними газами представлені в таблиці 1.

В залежності від коефіцієнту надлишку повітря та режиму роботи двигуна було визначено концентрацію CO та CO_2 , та побудовані графіки, які представлені на Рис. 1 та Рис. 2.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОШУК МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Дані представлені в таблиці 1 дали основу для пошуку математичної моделі, як основи системи математичних співвідношень, що максимально релевантно

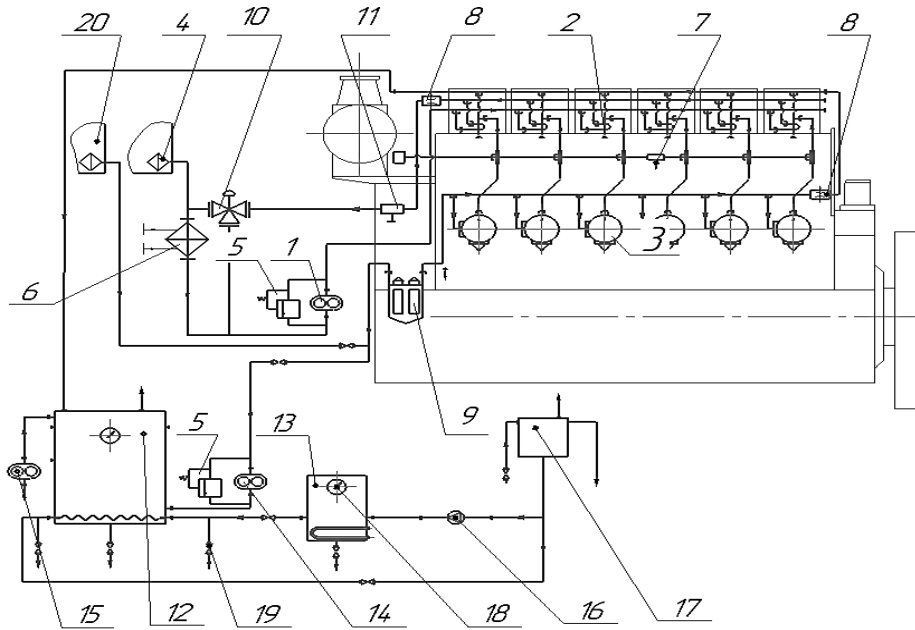


Рис. 1. Принципова схема дизельної паливної системи при роботі на соєвій олії:

- 1 – паливний насос; 2 – труба охолодження; 3 – паливний насос високого тиску;
- 4 – ситечко; 5 – редукційний клапан; 6 – радіатор палива; 7 – нагнітальний клапан;
- 8 – дросельна заслінка; 9 – фільтр тонкого очищення палива; 10 – регулятор температури;
- 11 – ресивер; 12 – бак для подачі рослинної олії; 13 – електричний котел; 14 – насос подачі рослинної олії; 15 – насос подачі палива в резервуар подачі; 16 – водяний насос;
- 17 – розширювальний бак; 18 – термометр;
- 19 – запірні арматура; 20 – бак подачі дизельного палива

Таблиця 1. Результати замірів викидів CO з випускними газами

Параметри	Розмірність	Потужність дизель-генератора, кВт.											
		453				675				903			
1. Коефіцієнт надлишку повітря α	-	2,79	2,80	2,81	2,82	2,60	2,62	2,61	2,63	2,55	2,56	2,54	2,55
2. Концентрація O ₂ .	%	13,3	13,2	13,5	13,4	13,1	13,0	13,2	12,9	12,7	12,8	12,9	12,8
3. Концентрація CO ₂ .	%	5,5	5,4	5,5	5,6	5,8	5,9	5,7	5,9	6,0	6,1	6,2	6,0
4. Концентрація CO	ппм	58	61	60	59	77	78	80	79	88	89	90	89

та адекватно описує фізичний процес, подію чи явище. Враховуючи особливості динаміки шкідливих викидів токсичних компонентів відпрацьованих газів середнього обортового дизеля працюючого на соєвій олії в залежності від навантаження, були задіяні математичні моделі з лінійним характером [11].

Тому в нашому випадку було обрано та побудовано лінійне регресійне рівняння виду

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 \quad (1)$$

для оцінювання викидів CO з випускними газами двигун-генератора ДГА-900 в залежності від потужності двигун-генератора X_1 у кВт. Викиди CO визначаються відповідною концентрацією у мг/м³ (O_{2н} = 15%).

Оцінки параметрів рівняння виду (1) b_0 та b_1 знаходилися за методом найменших квадратів [12, 13].

Була перевірена значимість параметрів за критерієм Стюдента [14]. Для рівня значущості 0,05 всі параметри є значимими.

Якість регресійного рівняння виду (1) перевірялася за коефіцієнтом детермінації R^2 , середньою величиною відносної помилки MMRE (Mean Magnitude of Relative Error) і відсотком прогнозованих результатів PRED (Percentage of Prediction), для яких величини відносної помилки MRE (Magnitude of Relative Error) менші за 0,25, PRED (0,25).

Також були розраховані довірчі інтервали та інтервали прогнозування лінійної регресії [8].

Для однофакторної лінійної регресії (1) довірчий інтервал визначався як

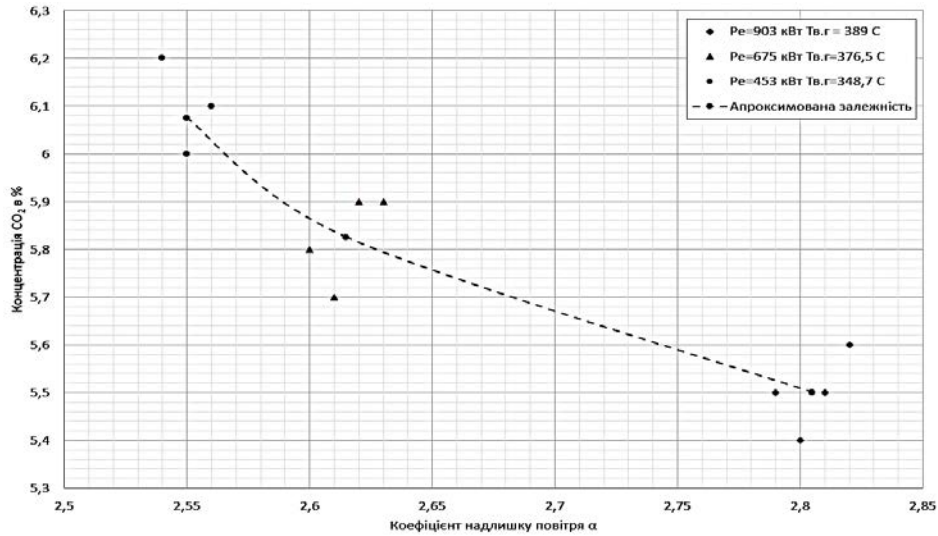


Рис. 1. Графік залежності концентрації вуглекислого газу CO₂ від коефіцієнту надлишку повітря та режиму роботи двигуна

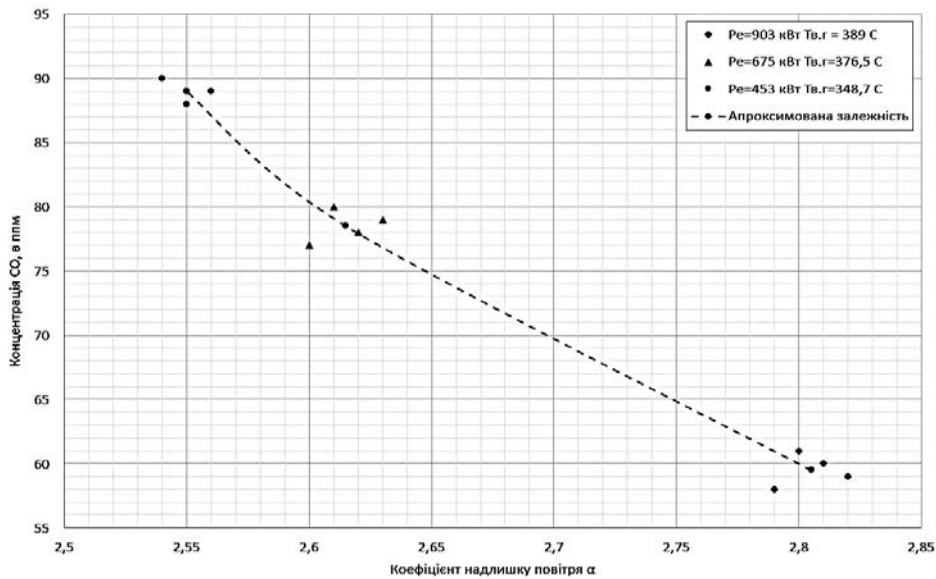


Рис. 2. Графік залежності концентрації оксиду вуглецю CO від коефіцієнту надлишку повітря та режиму роботи двигуна

$$\hat{Y}_i \pm t_{\alpha/2, N-2} S_Y \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{(X_{1i} - \bar{X}_1)^2}{S_{X_1 X_1}}}, \quad (2)$$

а інтервал прогнозування – як

$$\hat{Y}_i \pm t_{\alpha/2, N-2} S_Y \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(X_{1i} - \bar{X}_1)^2}{S_{X_1 X_1}}}. \quad (3)$$

де $t_{\alpha/2, N-2}$ – квантиль t -розподілу Стьюдента з $N-2$ ступенями свободи та $\alpha/2$ рівнем значущості

$$S_Y^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2; \quad \bar{X}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i}; \quad S_{X_1 X_1} = \sum_{i=1}^N (X_{1i} - \bar{X}_1)^2.$$

В подальшому нижні та верхні границі зазначених інтервалів позначаються відповідно як LB та UB.

Результати оцінювання викиду CO \hat{Y} з випускними газами за рівнянням (1) наведені в таблиці 2. Також в таблиці 2 наведені значення відносної помилки MRE, довірчі інтервали та інтервали прогнозування лінійної регресії.

В цьому випадку значення оцінок параметрів b_0 та b_1 дорівнюють 40,6485 та 0,04495, а значення

Таблиця 2. Результати оцінювання викиду CO

№	X ₁	Y	Ŷ	MRE	Довірчий інтервал		Інтервал прогнозування	
					LB	UB	LB	UB
1	453	61	61.0	0.0002	59.4	62.7	57.0	65.0
2	453	59	61.0	0.0341	59.4	62.7	57.0	65.0
3	453	60	61.0	0.0169	59.4	62.7	57.0	65.0
4	453	61	61.0	0.0002	59.4	62.7	57.0	65.0
5	675	72	71.0	0.0140	69.9	72.0	67.2	74.8
6	675	73	71.0	0.0275	69.9	72.0	67.2	74.8
7	675	71	71.0	0.0001	69.9	72.0	67.2	74.8
8	675	74	71.0	0.0406	69.9	72.0	67.2	74.8
9	903	80	81.2	0.0155	79.6	82.9	77.3	85.2
10	903	81	81.2	0.0030	79.6	82.9	77.3	85.2
11	903	79	81.2	0.0284	79.6	82.9	77.3	85.2
12	903	82	81.2	0.0092	79.6	82.9	77.3	85.2

показників якості рівняння (1) R^2 , MMRE та PRED (0,25) є відповідно такими: 0,9688, 0,0158 та 1,0. Останнє вказує на добру якість рівняння (1).

**ОБГОВОРЕННЯ
ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Результати даних досліджень обговорювалися на 27 rd International Scientific Conference on Transport Means 2023 04-06.10.2023. (S. Dotsenko, V. Nesterenko, A. Lysykh, O. Hrabovenko, I. Shvets (2023). *Mathematical modelling of emissions of toxic components of a medium speed diesel engine when operating on soybean oil.* // 27rd International

Scientific Conference on Transport Means 2023 04-06.10.2023: – Palanga, Lithuania, 2023. – Pages 921-929).

ВИСНОВКИ

1. Визначено кількісний еквівалент шкідливих викидів оксиду вуглецю (CO) у випускних газах поршневого дизельного двигуна при роботі дизель-генератора на соєвій олії в залежності від режиму роботи двигуна.
2. Вперше побудована лінійна математична модель для оцінювання викидів CO з випускними газами дизель-генератора ДГА-900 при роботі на соєвій олії в залежності від потужності.

REFERENCES

[1] César, A. S., Conejero, M. A., Ribeiro, E. C. B., & Batalha, M. O. (2019). Competitiveness analysis of "social soybeans" in biodiesel production in Brazil. *Renewable Energy*, Vol. 133, pp. 1147–1157. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.108>

[2] Aguilar-Aguilar, F. A., Mena-Cervantes, V. Y., Hernandez-Altamirano, R. (2025). Analysis of public policies and resources for biodiesel production in México. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 196, page 107762. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107762>

[3] Bakeas, E., Karavalakis, G., & Stournas, S. (2011). Biodiesel emissions profile in modern diesel vehicles. Part I: Effect of biodiesel origin on the criteria emissions. *Science of The Total Environment*, Vol. 409, Issue 9, pp. 1670-1676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.024>

[4] Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Fattah, I. R., & Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 23, pp. 473-490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.003>

[5] Benhurt Gongora, Reinaldo A. Bariccatti, Samuel N. M. de Souza, Douglas Bassegio, Rodrigo Sequinel. (2025) Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by babassu and soybean biodiesels. *Engenharia Agrícola*. Vol. 45, e20230166. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v45e20230166/2025>

[6] Marmut, I. A., Bezridnyi, V. V. (2025). Matematychni modeli dlya rozrakhunku vykydiv toksychnykh rechovyh avtobusa z dyzel'nym dvyhunom [Mathematical models for calculating the emissions of toxic substances of a bus with a diesel engine]. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti*, 2025, no. 2(25), pp. 210-219. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1929> [in Ukrainian].

[7] Shvets, I., Hrabovenko, O., Dotsenko, S., Nesterenko, V. (2020). Results of the Experimental Research of the Medium Speed Diesel Engine Work on Soybean Oil. *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means: – Kaunas, Lithuania, 2020 – II part*, pp. 671-675.

[8] Postanova Verkhovnoyi Rady Ukrainy vid 16.07.2024 r [Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine dated July 16, 2024] Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3864-20#Text> [in Ukrainian].

[9] Chrenichenko, O., Tkach, M., Dotsenko, S. (2019). The Usage of a Waste Heat Recovery Metal-Hydride Unit of Continuous Operation in the Maritime Energy 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, pp. 510-513.

[10] Dotsenko, S. M., Grabovenko, O. I., Shvets, I. A., Lysykh, A.Y. (2023). Eksperymental'ni doslidzhennya ekolohichnykh parametriv dyzel'noho dvyhuna pry roboti na soyeviy oliyi [Experimental studies of the environmental parameters of a diesel engine when running on soybean oil]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK*. no. 2-3 (491-492), pp. 49-56. [https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3\(491-492\).7](https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3(491-492).7) [in Ukrainian].

- [11] Dotsenko, S., Nesterenko, V., Lysykh, A., Hrabovenko, O., Shvets I. (2023). Mathematical modelling of emissions of toxic components of a medium speed diesel engine when operating on soybean oil. *Proceedings of 27th International Scientific Conference on Transport Means 2023* 4-6.10.2023: – Palanqa, Lithuania, pp. 921-929. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference>
- [12] Montgomery, D. C., Peck, E.A. and Vining G.G. *Introduction to Linear Regression Analysis*, 6th ed., Wiley, 2021. pp. 1-12 <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-16125104-1a3a7c5bd1.pdf>.
- [13] Prykhodko, S., Prykhodko, N. (2020) Mathematical Modeling of Non-Gaussian Dependent Random Variables by Nonlinear Regression Models Based on the Multivariate Normalizing Transformations. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. MODS 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1265. Springer, Cham., 2021, pp. 166-174. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_16.
- [14] Prykhodko, S., Prykhodko, N., Makarova, L., and Pugachenko, K. (2017) Detecting outliers in multivariate non-Gaussian data on the basis of normalizing transformations. *First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 846-849. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100366>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] César, A. S., Conejero, M. A., Ribeiro, E. C. B., & Batalha, M. O. (2019). Competitiveness analysis of "social soybeans" in biodiesel production in Brazil. *Renewable Energy*. Vol. 133, pp. 1147-1157. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.108>
- [2] Aguilar-Aguilar, F. A., Mena-Cervantes, V. Y., Hernandez-Altamirano, R. (2025). Analysis of public policies and resources for biodiesel production in México. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 196, page 107762 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107762>
- [3] Bakeas, E., Karavalakis, G., & Stournas, S. (2011). Biodiesel emissions profile in modern diesel vehicles. Part 1: Effect of biodiesel origin on the criteria emissions. *Science of The Total Environment*. Vol. 409, Issue 9, pp. 1670-1676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.024>
- [4] Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Fattah, I. R., & Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 23, pp. 473-490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.003>
- [5] Benhurt Gongora, Reinaldo A. Bariccatti, Samuel N. M. de Souza, Douglas Bassegio, Rodrigo Sequinel. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by babassu and soybean biodiesels. *Engenharia Agrícola* Vol. 45, e20230166. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v45e20230166/2025>
- [6] Мармут, І. А., Безрідний, В. В (2025). Математичні моделі для розрахунку викидів токсичних речовин автобуса з дизельним двигуном. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. № 2(25), С. 210-219. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1929>
- [7] Shvets, I., Hrabovenko, O., Dotsenko, S., Nesterenko, V. (2020). Results of the Experimental Research of the Medium Speed Diesel Engine Work on Soybean Oil. *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means: – Kaunas, Lithuania*, I part, pp. 671-675.
- [8] Постанова Верховної Ради України від 16.07.2024 р. № 3864-IX <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3864-20#Text>.
- [9] Chrenichenko, O., Tkach, M., Dotsenko, S. (2019). The Usage of a Waste Heat Recovery Metal-Hydride Unit of Continuous Operation in the Maritime Energy *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 5 10-513.
- [10] Доценко, С. М., Грабовенко, О. І., Швець, І. А., Лисих, А. Ю. (2023). Експериментальні дослідження екологічних параметрів дизельного двигуна при роботі на соєвій олії. *Збірник наукових праць НУК*. № 2-3 (491-492). – С. 49-56. [https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3\(491-492\).7](https://doi.org/10.15589/znp2023.2-3(491-492).7)
- [11] Dotsenko, S., Nesterenko, V., Lysykh, A., Hrabovenko, O., Shvets I. (2023). Mathematical modelling of emissions of toxic components of a medium speed diesel engine when operating on soybean oil. *Proceedings of 27th International Scientific Conference on Transport Means 2023* 04-06.10.2023: – Palanqa, Lithuania, pp. 921-929. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference>
- [12] Montgomery, D. C., Peck, E.A. and Vining, G.G. *Introduction to Linear Regression Analysis*, 6th ed., Wiley, 2021. pp. 1-12. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-16125104-1a3a7c5bd1.pdf>.
- [13] Prykhodko, S. and Prykhodko N. Mathematical Modeling of Non-Gaussian Dependent Random Variables by Nonlinear Regression Models Based on the Multivariate Normalizing Transformations. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. MODS 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1265. Springer, Cham., 2021, pp. 166-174. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_16.
- [14] Prykhodko, S., Prykhodko, N., Makarova, L. and Pugachenko, K. Detecting outliers in multivariate non-Gaussian data on the basis of normalizing transformations 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 846-849, <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100366>.

© Доценко С. М., Лисих А. Ю., Капура І. А., Шостак О. В.

Дата першого надходження статті до видання: 27.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

