

<https://doi.org/10.15407/fmmit2026.42.098>

## Математичне моделювання характеристик двигуна при використанні дизельного та біологічного палива

Оксана Шпак<sup>1</sup>, Адріан Петровський<sup>2</sup>, Назарій Великий<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри «Комп'ютеризовані системи автоматики»

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Ст. Бандери, 12, 79013, Львів, e-mail: [oksana.i.shpak@lpnu.ua](mailto:oksana.i.shpak@lpnu.ua)

<sup>2</sup>магістр кафедри «Комп'ютеризовані системи автоматики»

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Ст. Бандери, 12, 79013, Львів, e-mail: [adrian.petrovskiy.mknuo.2024@lpnu.ua](mailto:adrian.petrovskiy.mknuo.2024@lpnu.ua)

<sup>3</sup>ад'юнкт денної докторантури, ад'юнкти

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,

вул. Клепарівська, 35, 79009, e-mail: [nvelukuy6@gmail.com](mailto:nvelukuy6@gmail.com)

*Розглянуто функціональні характеристики дизельних двигунів, що працюють на традиційному та біологічному паливі. Запропоновано підхід до характеристик двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) з переходом на альтернативні види палива. Досліджено вплив фізико-хімічних властивостей біодизельного палива на роботу ДВЗ. Реалізовано одновимірну математичну модель двигуна з системою впорскування палива. Використано комп'ютерне моделювання для оцінки динаміки змін основних властивостей ДВЗ.*

**Ключові слова:** біодизель, дизельний двигун, альтернативне паливо, комп'ютерне моделювання, GT-Power, теплотехнічні характеристики, екологічна ефективність, віртуальний експеримент, паливна апаратура, викиди CO<sub>2</sub> і NOx.

**Вступ.** Сучасний розвиток транспортної галузі супроводжується зростанням споживання енергетичних ресурсів та посиленням вимог до екологічної безпеки двигунів внутрішнього згоряння. Традиційне дизельне паливо, незважаючи на високі енергетичні показники та широке застосування, є значним джерелом шкідливих викидів у навколишнє середовище, що зумовлює необхідність пошуку альтернативних видів палива та підвищення ефективності енергетичних установок.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання біологічного палива, отриманого з відновлюваної сировини. Біопаливо характеризується зниженим рівнем токсичних викидів, біорозкладністю та можливістю часткової або повної заміни традиційних нафтопродуктів без суттєвих конструктивних змін двигуна. Водночас фізико-хімічні властивості біологічного палива відрізняються від характеристик дизельного, що впливає на процеси сумішоутворення, згоряння та експлуатаційні показники двигуна.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу різних видів палива на ефективні, економічні та екологічні характеристики дизельних двигунів. Аналіз параметрів роботи двигуна при використанні дизельного та біологічного палива дозволяє оцінити можливість їх практичного застосування, визначити оптимальні режими роботи та встановити закономірності зміни основних експлуатаційних показників.

## 1. Аналітичний огляд.

В умовах енергетичної нестабільності в Україні біодизель розглядається як перспективна альтернатива традиційному паливу для дизельних двигунів без суттєвих конструктивних змін. Його фізико-хімічні відмінності (вища в'язкість, густина, температура самозаймання та нижча теплота згоряння) впливають на процеси впорскування, займання і згоряння, що проявляється у зниженні показника індикаторного середнього ефективного тиску ІМЕР та зростанні показника питомої ефективної витрати палива BSFC, хоча термічний ККД залишається відносно стабільним (рис.1.1) [1-5].

Моделювання в GT-Power показало, що зі збільшенням частки біодизеля (B20–B100) знижується ефективність згоряння, зростає витрата пального та затримка займання, але зменшуються пікові температури і потенційні викиди NOx. Водночас виникає баланс між задимленням і викидами: зниження NOx супроводжується зростанням димності, що потребує оптимізації параметрів упорскування та EGR (рис.1).

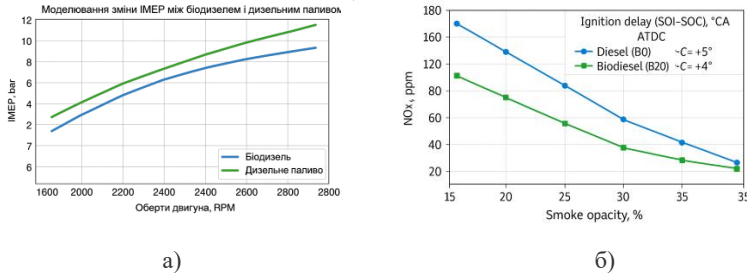


Рис.1. а) Графік моделювання зміни ІМЕР або BSFC; б) Залежність концентрації NOx та димності вихлопу від стратегії упорскування пального

У високогірних умовах ( $\geq 1000$ – $2500$  м) ефективність двигуна додатково погіршується через зниження щільності повітря: ІМЕР зменшується до 5–12 %, а BSFC зростає до 8 %, при цьому збільшується затримка займання і димність. Це вимагає адаптивного керування впорскуванням, наддувом і рециркуляцією газів.

Незважаючи на наявні дослідження, залишається обмеженим комплексний аналіз взаємодії складу пального, режимів роботи двигуна та зовнішніх умов. Перспективним напрямом є розроблення багатofакторних моделей і адаптивних алгоритмів керування, що дозволяють оптимізувати ефективність і екологічні

показники дизельних двигунів при використанні біодизеля в реальних умовах експлуатації.

## 2. Методологія дослідження та об'єкт моделювання.

**2.1. Обґрунтування вибору методу комп'ютерного моделювання.** Дослідження ефективності використання біодизельного пального в дизельних двигунах виконано із застосуванням методу комп'ютерного моделювання, що дозволяє комплексно врахувати фізико-хімічні властивості пального, параметри робочого процесу та змінні атмосферні умови без проведення ресурсоємних експериментів (рис.2). Як базовий підхід обрано одновимірне (1D) термогазодинамічне моделювання, реалізоване в середовищі GT-Power, яке забезпечує оптимальний баланс між точністю результатів, обчислювальною ефективністю та можливістю багатопараметричного аналізу [5].

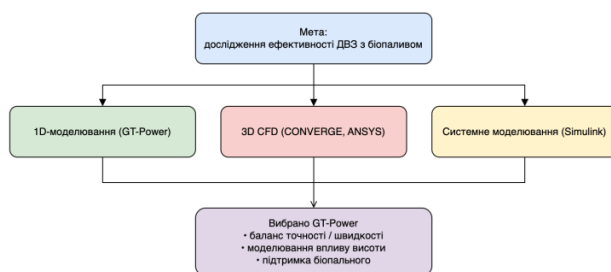


Рис.2. Схема вибору (вимоги) методу комп'ютерного моделювання

Об'єктом дослідження є чотиритактний дизельний двигун із турбонадувом об'ємом 2.0–2.2 л, оснащений системою CommonRail, рециркуляцією відпрацьованих газів (EGR) та турбіною зі змінною геометрією. У межах моделі відтворено геометричні та кінематичні параметри двигуна (діаметр циліндра, хід поршня, ступінь стиску, фази газорозподілу), а також реалізовано модулі впорскування, згоряння та наддуву. Процес згоряння описано аналітичною моделлю з можливістю налаштування параметрів тепловиділення, що дозволяє коригувати характеристики займання залежно від складу пального.

Методика дослідження передбачає варіювання типу пального (B0, B20, B50, B100) із урахуванням його основних фізико-хімічних властивостей: густини, в'язкості, нижчої теплоти згоряння, температури самозаймання та вмісту кисню. Це забезпечує адекватне відтворення процесів упорскування, розпилення та займання. Додатково реалізовано багатозафазне впорскування (попереднє, основне, поствпорскування) з можливістю зміни кутів початку впорскування, тривалості фаз і тиску подачі пального [8-10].

Окремим елементом методології є врахування впливу зовнішніх умов експлуатації. У моделі змінюються параметри атмосферного тиску та температури, що дозволяє імітувати роботу двигуна на різних висотах над рівнем моря. Це дає змогу оцінити зміну коефіцієнта надлишку повітря, ефективності згоряння та екологічних показників у реальних умовах експлуатації.

Критеріями оцінювання виступають індикаторний середній ефективний тиск (IMEP), питома ефективна витрата пального (BSFC), параметри займання, максимальна температура згоряння, а також показники викидів (NOx і димність). Дослідження проводиться шляхом серії чисельних експериментів із послідовною зміною складу пального, режимів навантаження, стратегій упорскування та параметрів EGR. Отримані результати аналізуються у порівняльному аспекті для визначення впливу кожного фактора та їх взаємодії [11-14].

Таким чином, запропонована методологія базується на інтегрованому підході до моделювання робочого процесу дизельного двигуна, що поєднує варіювання властивостей пального, параметрів керування та зовнішніх умов. Це дозволяє забезпечити достовірну оцінку ефективності та екологічних характеристик двигуна при використанні біодизеля і сформулювати рекомендації щодо оптимізації його роботи.

**2.2. Побудова одновимірної (1D) математичної моделі.** Для дослідження роботи дизельного двигуна на біодизелі застосовано одновимірне моделювання в GT-Power, що забезпечує баланс між точністю та обчислювальною ефективністю. Модель включає геометричні параметри двигуна (циліндри, ступінь стиску, клапанний механізм), а також системи впуску, випуску, турбонаддуву та EGR (рис.3).

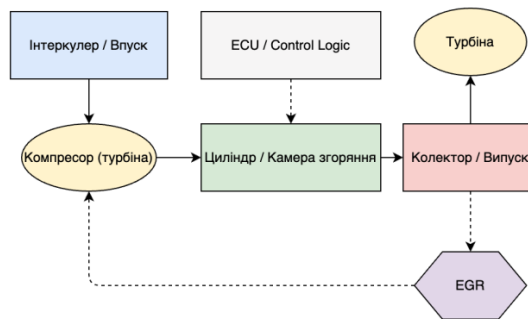


Рис.3. Схема моделі з основними вузлами - адаптована до GT-Power

Процес згоряння описано функцією Wiebe з урахуванням властивостей біодизеля (в'язкість, теплота згоряння, кисневмісність), а впорскування реалізовано як багатофазне з регульованими параметрами. У моделі враховано зміну атмосферного тиску і температури для імітації високогір'я, а також тепло- і масообмін у трактах.

Додатково реалізовано розрахунок затримки займання та утворення NOx (за механізмом Зельдовича). Вхідні параметри (тиск, температура, склад пального, режими роботи) варіюються у вигляді сценаріїв, що дозволяє оцінити вплив біодизеля та умов експлуатації на ефективність і викиди двигуна.

### 2.3. Матриця комп'ютерних експериментів

Для чисельного дослідження сформовано факторну експериментальну матрицю, що охоплює основні змінні, які впливають на процес згоряння, економічність та викиди дизельного двигуна при використанні біодизеля.

Варійовані фактори включають: тип пального (D100, B20, B50, B100), висоту над рівнем моря (0–2000м), стратегію впорскування (одинарне, дво- та трифазне) та рівень EGR (0–30 %). Це дозволяє оцінити вплив як окремих параметрів, так і їх взаємодії в різних умовах експлуатації (рис.4).

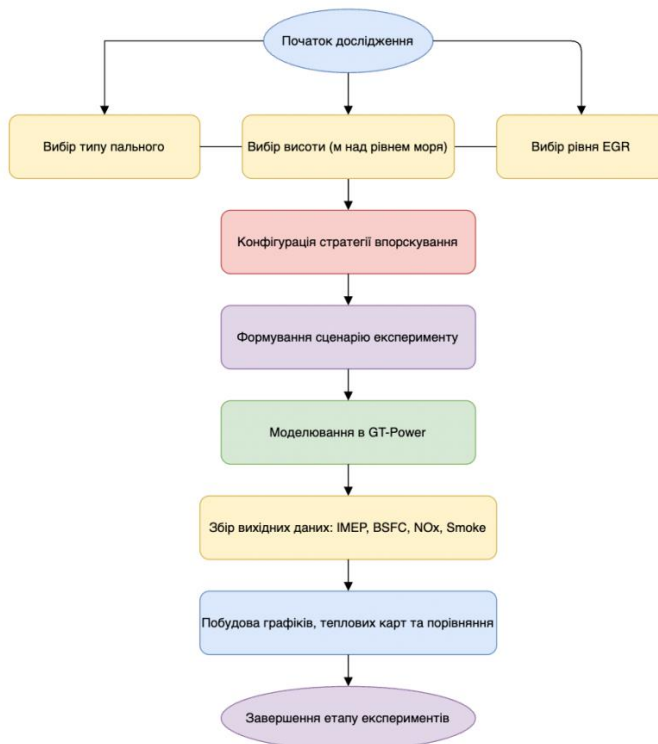


Рис.4. Блок-схема експериментального процесу

Сформовано чотири характерні сценарії:

- A (базовий): D100, рівень моря, без EGR;
- B (перехідний): B20, 1000 м, EGR 10 %, двофазне впорскування;
- C (ускладнений): B50, 1500 м, EGR 20 %, трифазне впорскування;
- D (екстремальний): B100, 2000 м, EGR 30 %, одинарне впорскування.

Такий підхід забезпечує аналіз роботи двигуна в широкому діапазоні реальних і критичних умов експлуатації та дозволяє оцінити стійкість системи до зміни пального й атмосферних факторів [6, 7].

Для кожного сценарію оцінювались основні вихідні параметри: IMEP, BSFC, температура вихлопу, максимальний тиск у циліндрі, затримка займання,

NOx та димність. Виявлено, що зміна окремих факторів спричиняє взаємопов'язані ефекти в роботі двигуна.

Зокрема, підвищений вміст кисню в В100 полегшує займання, але на великих висотах може призводити до зміщення пікового тиску та потреби корекції впорскування. Водночас поєднання трифазного впорскування з В50 на висоті 1500 м забезпечило зниження BSFC приблизно на 3,5 %.

Додатково досліджено вплив кута початку впорскування (SOI від  $-15^\circ$  до  $0^\circ$  КВП), що дозволило встановити залежність між моментом упорскування та формуванням тепловиділення в циліндрі [15-17]. Загалом матриця експериментів забезпечила повне охоплення сценаріїв і дозволила визначити оптимальні режими роботи двигуна на біодизелі в різних умовах.

### 3. Аналіз результатів моделювання та їх верифікація.

**3.1. Вплив висоти та складу палива на експлуатаційні характеристики.** Зі збільшенням висоти над рівнем моря знижується густина повітря та вміст кисню, що погіршує процес згоряння і зменшує ефективність двигуна. Моделювання в GT-Power показало, що при 2000 м ІМЕР зменшується на 10–14 % для D100 і на 15–18 % для В100, тоді як для В20 втрати є меншими (8–10 %) (рис. 5).

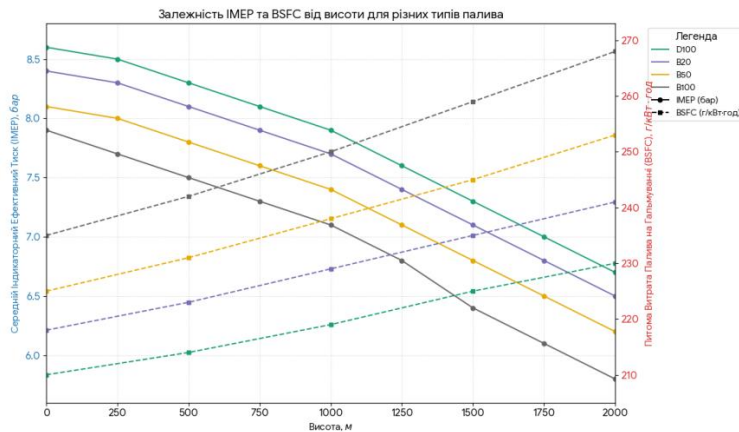


Рис.5. Залежність ІМЕР та BSFC від висоти для різних типів палива

Також знижується максимальний тиск у циліндрі та швидкість наростання тиску, що свідчить про уповільнення згоряння. Для біодизеля ці ефекти виражені сильніше через вищу в'язкість і затримку займання. Додатково зменшується повітряний заряд через падіння ефективності турбонадуву (до  $\sim 20\%$  на 2000 м).

Зміна складу пального впливає на тепловиділення: для В100 спостерігається зсув піку згоряння на  $3\text{--}5^\circ$  КВП пізніше, що знижує термодинамічну ефективність. Найбільш стабільні показники в гірських умовах демонструє В20, який частково компенсує дефіцит кисню завдяки власній кисневмістості.

**3.2. Аналіз економічності та теплової ефективності (BSFC).** Питома витрата пального (BSFC) зростає зі збільшенням частки біодизеля та висоти над рівнем моря. Для D100 вона становить  $\sim 210\text{--}212$  г/кВт·год, тоді як для B20, B50 і B100 зростає відповідно на 4%, 7–9% і понад 12%. На висоті до 1500–2000 м BSFC для B100 може досягати 260+ г/кВт·год через зниження наповнення циліндрів і дефіцит кисню (рис.6).

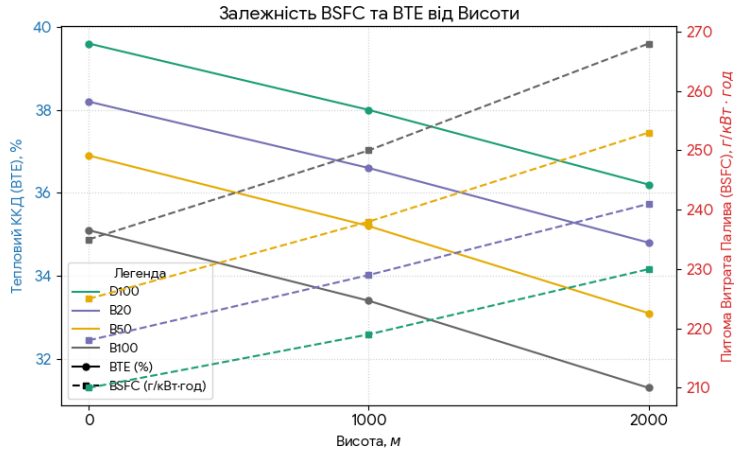


Рис.6. Графік ефективної потужності двигуна та загальна енергетична ефективність (BTE, BSFC)

Теплова ефективність ( $\eta_t$ ) знижується для біопального: для B100 приблизно на 6–8% у порівнянні з дизелем, що пов'язано з повільнішим згорянням і нижчою теплою згоряння. Найкращий компроміс показує B20–B30, де втрати економічності мінімальні.

Критичним фактором є зниження коефіцієнта надлишку повітря  $\lambda$  у високогір'ї (до 1.2–1.3 для B100), що погіршує згоряння і підвищує BSFC. Частково компенсація можлива через корекцію кута впорскування та багатофазне впорскування, що дозволяє зменшити втрати ефективності на 5–6 г/кВт·год.

**3.3. Дослідження характеристик процесу згоряння.** Згоряння в дизельному двигуні суттєво змінюється при переході на біодизель і при роботі у високогір'ї. Моделювання в GT-Power показало, що для B100 затримка займання зростає, а початок згоряння зміщується приблизно з  $\sim 11^\circ$  до  $\sim 7.5^\circ$  до ВМТ (і ще додатково в пізніший бік на висоті) (рис.7).

Крива тепловиділення для дизеля має короткий різкий пік, тоді як для біодизеля вона більш розтягнута і з меншим максимумом (до  $\sim 30\%$  інтенсивності), що знижує швидкість наростання тиску та ІМЕР ( $\approx 5\text{--}8\%$ ).

**Оксана Шпак, Адріан Петровський, Назарій Великий**  
**Математичне моделювання характеристик двигуна при використанні дизельного та біологічного палива**

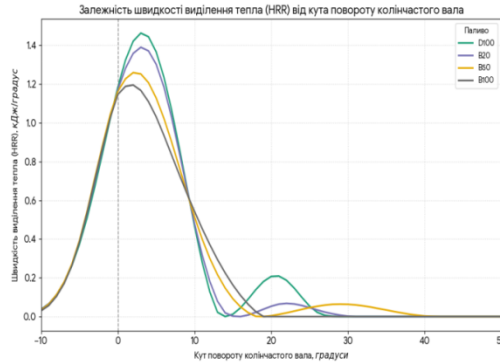


Рис.7. Графік залежності виділення тепла (HRR) від кута повороту колінчастого вала

У високогір'ї через дефіцит кисню і зниження наповнення циліндрів ( $\lambda$  падає до  $\sim 1.2-1.3$  для B100) пік тиску зміщується після ВМТ, погіршуючи ефективність і збільшуючи тривалість згоряння.

Найбільш стабільні результати показує B20, який частково компенсує дефіцит кисню і забезпечує близькі до дизеля характеристики при менших викидах.

Загалом біодизель забезпечує більш м'яке, але повільніше згоряння, тому потребує корекції впорскування (багатофазність, зсув SOI) для відновлення ефективності циклу.

**3.4.Аналіз екологічних показників (викидів) у високогірних умовах.** У високогірних умовах (0 – 3000 м) екологічні показники дизельного двигуна суттєво змінюються через дефіцит кисню та погіршення процесу згоряння (рис.8).

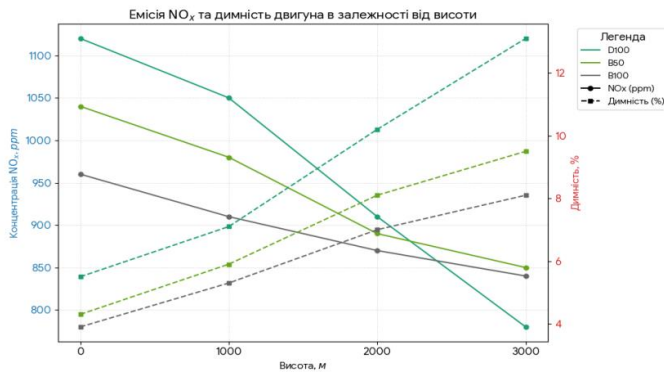


Рис.8. Графік емісії оксидів азоту ( $NO_x$ ) та димність - залежно від висоти та типу палива

Моделювання показало, що  $NO_x$  у всіх типів пального зменшується приблизно на 20–25% із висотою через нижчі температури згоряння. Водночас димність зростає: для D100 на 30–40%, для біодизеля — на 15–25%, завдяки вмісту кисню в його структурі, який частково покращує окиснення сажі.

Біодизель (особливо B20 – B50) демонструє кращі екологічні показники в горах: менше диму та стабільніше згоряння, хоча при B100 можливе зростання CO і HC через затримку займання.

Таким чином, підтверджується компроміс “NOx–димність”: зниження NOx супроводжується ростом димності, особливо для дизеля. Біодизель частково пом’якшує цей ефект і є більш екологічно прийнятним у високогір’ї, за умови оптимізації впорскування та EGR.

**3.5 Дослідження синергетичного впливу стратегій впорскування та наукова новизна.** Досліджено синергетичний вплив стратегій багатofазного впорскування та складу біодизельного палива на роботу дизельного двигуна в умовах високогір’я. Показано, що комбінація перед-, основного та поствпорскування дозволяє адаптувати процес згоряння до зниженого атмосферного тиску, зменшуючи жорсткість згоряння та покращуючи розподіл тепловиділення (рис.3.5).

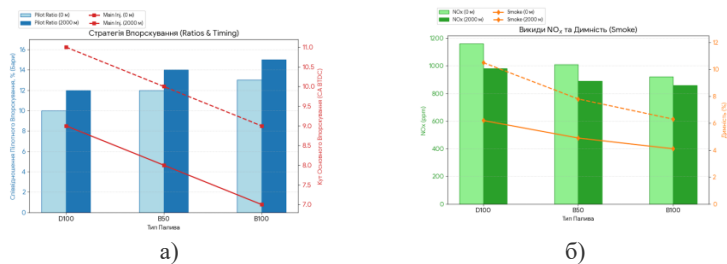


Рис.9. а) Графік залежності стратегії впорскування в залежності від вибору трифазного режиму; б) Графік залежності викидів NOx та димності від вибору палива

Найефективнішою виявилась трифазна схема впорскування, яка забезпечила зниження димності на 22–27% для B50–B100 при незначному впливі на NOx (до +5%) порівняно з однофазним режимом. Додатково поствпорскування стабілізує температуру у випускній системі, що покращує роботу DPF та SCR (рис.9).

Встановлено синергію між EGR і передвпорскуванням: адаптивне раннє впорскування компенсує негативний вплив зниженого кисню у високогір’ї та стабілізує займання.

**Висновки.** У роботі виконано комплексне дослідження роботи дизельного двигуна на паливі D100 та біодизельних сумішах (B20, B50, B100) в умовах змінної висоти над рівнем моря з використанням моделювання в GT-Power.

Встановлено, що зі зростанням висоти всі палива втрачають ефективність, однак біодизель (особливо B20–B50) демонструє кращу стабільність IMEP та робочих характеристик порівняно з D100. Показано, що B20 є найбільш збалансованим варіантом за економічністю, потужністю та екологічністю, тоді як B100 забезпечує найкращі екологічні показники, але має нижчу теплову ефективність.

Аналіз процесу згоряння (HRR) показав зміну його динаміки при переході до біопалива: зниження пікового тепловиділення та розширення фази згоряння, що впливає на термодинамічну ефективність. Водночас зафіксовано зниження NOx (до 20%) та димності (до 30–35%) для біодизельних сумішей у високогірних умовах.

Доведено, що багатофазне впорскування є ефективним інструментом оптимізації процесу згоряння, оскільки дозволяє зменшити димність, стабілізувати ІМЕР та частково компенсувати втрати потужності без суттєвого зростання NOx.

Отримані результати підтверджують доцільність використання біопалива в дизельних двигунах у складних умовах експлуатації та можуть бути використані для розробки адаптивних систем керування впорскуванням і оптимізації роботи ДВЗ.

### **Література**

- [1] V. G. Nguyen, M. T. Pham, N. V. L. Le, H. C. Le, T. H. Truong, and D. N. Cao, "A comprehensive review on the use of biodiesel for diesel engines," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 4, pp. 720-740, Jul. 2023. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54612>.
- [2] Tamilselvan, P. & Govindan, Nagarajan. (2013). Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel Having Varying Saturated Fatty Acid Composition. *International Journal of Green Energy*. 10. 10.1080/15435075.2012.732157.
- [3] Hasan, M.M. & Rahman, M.M., 2017. "Performance and emission characteristics of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 74(C), pp. 938-948.
- [4] LAKSHANE, G. A. U. R. A. N. G. (2024) "The Status of Biodiesel as an Alternative Fuel for Diesel Engine – An Overview."
- [5] Ifeanyi-Nze, F.O. "Impact of biodiesel engine performance on operations and the environment: A literature review." *European Journal of Sustainable Development Research*, 6(4), em0200, 2022.
- [6] Ai, Wenbo, and Haeng Muk Cho. 2024. "Predictive Models for Biodiesel Performance and Emission Characteristics in Diesel Engines: A Review" *Energies* 17, no. 19: 4805. <https://doi.org/10.3390/en17194805>
- [7] Avinash, A.; Sasikumar, P.; Pugazhendhi, A. Analysis of the Limiting Factors for Large Scale Microalgal Cultivation: A Promising Future for Renewable and Sustainable Biofuel Industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 134, 110250
- [8] Hajjari, M.; Tabatabaei, M.; Aghbashlo, M.; Ghanavati, H. A Review on the Prospects of Sustainable Biodiesel Production: A Global Scenario with an Emphasis on Waste-Oil Biodiesel Utilization. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 72, 445–464.
- [9] Knothe, G. Improving Biodiesel Fuel Properties by Modifying Fatty Ester Composition. *Energy Environ. Sci.* 2009, 2, 759–766.
- [10] Rakopoulos, C.D.; Antonopoulos, K.A.; Rakopoulos, D.C.; Hountalas, D.T.; Giakoumis, E.G. Comparative Performance and Emissions Study of a Direct Injection Diesel Engine Using Blends of Diesel Fuel with Vegetable Oils or Bio-Diesels of Various Origins. *Energy Convers. Manag.* 2006, 47, 3272–3287.
- [11] Giakoumis, E.G.; Rakopoulos, C.D.; Dimaratos, A.M.; Rakopoulos, D.C. Exhaust Emissions of Diesel Engines Operating under Transient Conditions with Biodiesel Fuel Blends. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2012, 38, 691–715.
- [12] Mishra, S.; Bukkarapu, K.R.; Krishnasamy, A. A Composition Based Approach to Predict Density, Viscosity and Surface Tension of Biodiesel Fuels. *Fuel* 2021, 285, 119056.
- [13] Dunn, R.O. Effect of Temperature on the Oil Stability Index (OSI) of Biodiesel. *Energy Fuels* 2008, 22, 657–662.

[14] Alptekin, E.; Canakci, M. Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel–Diesel Fuel Blends. *Renew. Energy* 2008, 33, 2623–2630.

[15] Ramírez Verduzco, L.F. Density and Viscosity of Biodieselas a Function of Temperature: Empirical Models. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 19, 652–665.

[16] Veza, I.; Spraggon, M.; Fattah, I.M.R.; Idris, M. Response Surface Methodology (RSM) for Optimizing Engine Performance and Emissions Fueledwith Biofuel: Reviewof RSM fo Sustainability Energy Transition. *ResultsEng.* 2023, 18, 101213.

[17] Saravanan, S.; Rajesh Kumar, B.; Varadharajan, A.; Rana, D.; Sethuramasamyraja, B.; Lakshmi Narayanarao, G. Optimization of DI Diesel Engine Parameters Fueled with Iso-Butanol/Diesel Blends—Response Surface Methodology Approach. *Fuel* 2017, 203, 658–670.

## Mathematical modeling of engine characteristics when using diesel and biological fuels

Oksana Shpak, Adrian Petrovsky, Nazariy Velyky

*The functional characteristics of diesel engines operating on traditional and biological fuels are considered. An approach to the characteristics of internal combustion engines (ICE) with the transition to alternative fuels is proposed. The influence of the physicochemical properties of biodiesel on the operation of the ICE is studied. A one-dimensional mathematical model of the engine with a fuel injection system is implemented. Computer modeling is used to assess the dynamics of changes in the main properties of the ICE.*

Отримано 04 05 2026