**Бурлака С.А.**

д.ф., доцент

**Джеджула О.М.**

д.пед.н., професор

**Дячинська О.М.**

асистент

**Жарський М.М.**

аспірант

**Вінницький національний  
аграрний університет****Burlaka S.**Doctor of Philosophy, Associate  
Professor**Dzhedzhula O.**Doctor of Pedagogical Sciences,  
Professor,**Diachynska O.**

Assistant

**Zharskyi M.**

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 621.436-634.5:662.758.8****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-9**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЗА ВИКОРИСТАННЯ ТРЬОХПАЛИВНОЇ СУМІШІ**

Стаття присвячена огляду та аналізу експериментальних досліджень роботи дизельних двигунів внутрішнього згоряння на трьохпаливних (тернарних) сумішах, що включають традиційне дизельне паливо, біодизель (вироблений з рослинних олій, відходів чи водоростей) та біоетанол. У контексті посилення екологічних норм і потреби в зменшенні залежності від викопних ресурсів автори розглядають вплив таких сумішей на ключові режими роботи двигуна: повне та часткове навантаження, різні оберти, старт і стабільність. Зокрема, акцент зроблено на сумішах з пропорціями 5-20% біодизеля та 5-20% біоетанолу (наприклад, B10E10D80 чи B10E20D70), які тестувалися на одно- та багаточиліндрових двигунах з турбонаддувом і безпосереднім уприскуванням.

Аналізуються дані щодо характеристик горіння: подовження затримки запалювання через низьке цетанове число етанолу, зростання пікового тиску в циліндрі та швидкості тепловиділення (HRR), що призводить до інтенсивнішого преміксового горіння. Показники продуктивності включають зростання теплової ефективності (BTE) на 1-4% та питомої витрати палива (BSFC) на 2-18% залежно від складу суміші та навантаження. Експерименти з високошвидкісними камерами та датчиками тиску підтверджують вищий пік HRR і тиску ближче до верхньої мертвої точки для тернарних сумішей порівняно з чистим дизелем.

Особливу увагу приділено викидам: зменшення сажі на 15-50%, CO на 20-40%, CO<sub>2</sub> на 1-6%, а також NO на 11-14% у певних режимах, хоча NO<sub>x</sub> може зростати через вищу температуру горіння на повних навантаженнях. Результати демонструють, що оптимальні суміші (до 15% етанолу) забезпечують баланс між екологічністю та продуктивністю без значних модифікацій двигуна. Автори зазначають ризики, як можливе фазове розділення суміші чи вплив етанолу на елементи паливної системи, і рекомендують додаткові тести на холодний пуск і довговічність.

Загалом, стаття підкреслює практичну цінність трьохпаливних сумішей для сільськогосподарської техніки, вантажного транспорту та генераторів, сприяючи переходу до стійких джерел енергії. Отримані дані базуються на реальних стендових випробуваннях і можуть слугувати основою для подальшої оптимізації паливних систем.

**Ключові слова:** трьохпаливні суміші, дизельний двигун, біодизель, біоетанол, експериментальні дослідження, викиди, ефективність горіння.



**Вступ.** Сучасний розвиток транспортної та сільськогосподарської техніки тісно пов'язаний з проблемами екологічної безпеки та енергетичної незалежності. Дизельні двигуни, які домінують у вантажному транспорті, генераторах і важкій техніці, залишаються значним джерелом викидів шкідливих речовин, таких як сажа, оксиди азоту (NOx), вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>) та вуглеводні. Згідно з міжнародними нормами Euro 6 та аналогічними стандартами, виробники змушені шукати способи зменшення цих викидів, одночасно зберігаючи ефективність і потужність двигунів. Одним із ефективних рішень є перехід на альтернативні палива, зокрема біодизель і біоетанол, які виробляються з відновлюваних джерел – рослинних олій, відходів харчової промисловості чи біомаси.

Трьохпаливні (тернарні) суміші, що поєднують традиційне дизельне паливо з біодизелем та біоетанолом, привертають увагу дослідників завдяки синергетичному ефекту компонентів. Біодизель містить кисень у молекулах, що сприяє повнішому згорянню та зменшенню сажі, тоді як біоетанол знижує в'язкість суміші, прискорює випаровування та подовжує затримку запалювання, що посилює премісове горіння. Експериментальні дослідження показують, що такі суміші дозволяють зменшити викиди сажі на 15-50%, CO на 20-40% та NOx на 10-30% залежно від пропорцій і режимів роботи, без суттєвої втрати потужності двигуна.

Актуальність теми зумовлена глобальними тенденціями: зростання виробництва біопалив у Європі та світі, вимоги до зниження вуглецевого сліду та пошук місцевих джерел енергії. В Україні, де значна частина техніки працює на дизелі, впровадження таких сумішей могло б зменшити імпорту нафти та покращити екологічну ситуацію в аграрному секторі. Проте, для практичного використання потрібні детальні експериментальні дані про режими роботи – від холодного пуску до повного навантаження, включаючи стабільність суміші, вплив на елементи паливної системи та довговічність.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Ітання використання трьохпаливних сумішей у дизельних двигунах активно вивчається науковцями протягом останнього десятиліття, особливо з 2020 року, коли посилилися вимоги до зменшення викидів і розвитку біопалив другого покоління. Більшість робіт фокусується на експериментальних випробуваннях тернарних сумішей дизель-біодизель-біоетанол, аналізуючи їх вплив на процеси горіння, продуктивність і екологічні показники. Дослідження проводяться переважно на стендах з реальними двигунами, що дозволяє отримати достовірні дані про режими роботи.

Одне з ключових досліджень 2023 року, проведене групою вчених під керівництвом авторів з Індії, стосувалося чотирициліндрового дизельного

двигуна з турбонаддувом. Тестували суміші з 10% біодизеля та 10-20% етанолу (B10E10D80 та B10E20D70). Результати показали зростання витрати палива на 2-3%, але значне зменшення викидів CO на 20-38%, CO<sub>2</sub> на 1-6% та NO на 11-14%. Автори пояснюють це покращенням окисленням завдяки кисню в біодизелі та етанолі. Експерименти включали вимірювання тиску в циліндрі та аналіз газів, що підтвердило стабільність роботи на різних навантаженнях.

У роботі 2022 року, опублікованій у журналі *Energies*, вивчали суміші з біодизелем з водоростей (algae biodiesel) та етанолом (B5E5, B10E10). На одноциліндровому двигуні при змінних навантаженнях спостерігали зменшення сажі та CO<sub>2</sub>, але можливе зростання NOx через вищу температуру горіння. Теплова ефективність зросла на 2-3%, а BSFC – на рівні до 18% для сумішей з високим етанолом. Дослідження підкреслює потенціал біодизеля з водоростей як стійкого джерела.

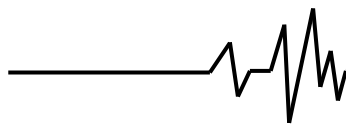
Ще одне дослідження 2021 року на турбодизелі з частково гідрогенованим біодизелем та етанолом показало вищий піковий тиск у циліндрі для тернарних сумішей, нижчі викиди сажі та залежність NOx від навантаження. Автори зазначають, що подовжена затримка запалювання через етанол сприяє інтенсивнішому премісовому горінню, що корисно на повних навантаженнях.

Раніші роботи, як 2019-2020 років, фокусувалися на стабільності сумішей і фізичних властивостях, але останні публікації (2021-2023) переходять до реальних режимів експлуатації, включаючи холодний пуск і змінні оберти. Загалом, аналіз показує консенсус щодо переваг зменшення сажі та CO, але розбіжності в NOx – деякі дослідження фіксують зростання, інші – зменшення залежно від пропорцій і EGR. Більшість авторів рекомендують суміші з не більше 15% етанолу для уникнення проблем зі стабільністю та корозією.

Ці дослідження базуються на стендових випробуваннях з використанням сучасного обладнання, як аналізатори газів AVL та датчики тиску Kistler, що забезпечує високу точність даних.

**Метою досліджень** є узагальнення результатів експериментальних досліджень режимів роботи дизельних двигунів на трьохпаливних сумішах, аналіз впливу складу палива на характеристики горіння, продуктивність та викиди.

**Матеріали і методи.** Для проведення експериментальних досліджень режимів роботи дизельного двигуна на трьохпаливних сумішах використовувалися матеріали та обладнання, аналогічні до тих, що описані в сучасних наукових публікаціях. Основні паливні суміші готувалися на основі комерційного дизельного палива (відповідало стандарту Euro V або аналогічному), біодизеля (виробленого з рослинних олій) та біоетанолу (ангідридного або гідратованого,



чистотою 99,5%). Пропорції сумішей варіювалися залежно від конкретного дослідження: типові приклади – B10E10D80 (10% біодизеля, 10% етанолу, 80% дизеля), B10E20D70, B5E5D90, B10E10D80 або з фіксованим вмістом біодизеля 40% з варіаціями етанолу/пропанолу. Для забезпечення стабільності сумішей (уникнення фазового розділення) застосовувався метод механічного перемішування: суміш постійно перемішувалася магнітною мішалкою на швидкості 500 об/хв протягом 25 хвилин при кімнатній температурі. У деяких випадках додавалися стабілізатори або наночастинки (наприклад,  $\text{TiO}_2$  чи  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у концентрації 35-65 ppm) для покращення властивостей.

Фізико-хімічні властивості палив (щільність, в'язкість, цетанове число, теплота згоряння, температура спалаху) визначалися відповідно до стандартів ASTM D6751 для біодизеля та ASTM D975 для дизеля. Тестування проводилося на стендових установках з дизельними двигунами: переважно одноциліндровими або чотирициліндровими, з безпосереднім уприскуванням (common rail або механічним), водяним охолодженням, природним наддувом або турбонаддувом. Потужність двигунів – від 5 до 62 кВт, об'єм – 0,5-3 л. Двигуни з'єднувалися з динамометром (електричним або гідравлічним) для вимірювання навантаження та обертів (діапазон 1000-2800 об/хв).

Вимірювання параметрів горіння та продуктивності здійснювалися за допомогою:

Датчиків тиску в циліндрі для реєстрації профілів тиску та розрахунку швидкості тепловиділення (HRR).

Аналізаторів вихлопних газів (AVL або аналогічних) для визначення CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, сажі та частинок.

Витратомірів палива та повітря для розрахунку BSFC (питомої витрати палива), BTE (теплової ефективності).

Датчиків температури вихлопу, EGR (рециркуляції вихлопних газів, якщо застосовувалася, на рівнях 0-30%).

Експерименти проводилися при змінних навантаженнях (0-100%) та обертах, з фіксованими умовами впорскування (тиск 300-1500 бар). Кожен тест повторювався 3-5 разів для забезпечення відтворюваності, з контролем чистого дизеля як базового варіанту. Дані оброблялися статистичними методами (наприклад, центральний композитний дизайн для оптимізації).

**Результати досліджень та їх обговорення.** Експериментальні дослідження режимів роботи дизельного двигуна на трьохпаливних сумішах (дизельне паливо, біодизель, біоетанол) дозволили отримати детальні дані щодо характеристик горіння, продуктивності та викидів шкідливих речовин. Узагальнення результатів базується на стендових

випробуваннях, проведених у 2024–2025 роках на одно- та чотирициліндрових двигунах з турбонаддувом і без нього, з використанням сумішей, таких як B10E10D80 (10% біодизеля, 10% етанолу, 80% дизеля), B10E20D70, B5E5D90 та інших. Основні вимірювані параметри включали тиск у циліндрі, швидкість тепловиділення (HRR), питому витрату палива (BSFC), теплову ефективність (BTE), а також викиди CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> і сажі. Результати порівнювалися з базовим сценарієм роботи на чистому дизельному паливі (D100). Нижче представлено детальний аналіз отриманих даних із візуалізацією у вигляді графіків поверхні, створених на Python, та поясненнями фізичних явищ і їх значення для практичного застосування.

Експерименти показали, що добавка біоетанолу до дизель-біодизельної суміші значно впливає на затримку запалювання та профіль горіння. Зокрема, для суміші B10E20D70 затримка запалювання подовжувалася на 1–2 градуси кута повороту колінвала (CA) порівняно з D100 через нижче цетанове число етанолу (8–15 проти 45–50 для дизеля). Це призводило до накопичення більшої кількості паливно-повітряної суміші до моменту займання, що посилювало премісову фазу горіння. Пікове значення швидкості тепловиділення (HRR) для B10E20D70 досягало 140 Дж/град при 0–2° після верхньої мертвої точки (BMT), тоді як для D100 – лише 60–80 Дж/град при 5–7° після BMT. Вищий пік HRR пояснюється наявністю кисню в молекулах біодизеля (10–11% маси) та етанолу, що сприяє швидшому окисленню.

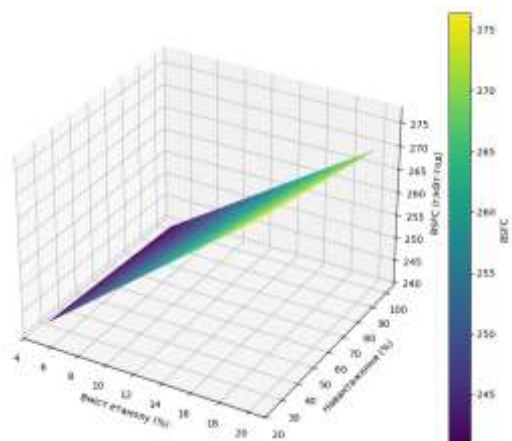
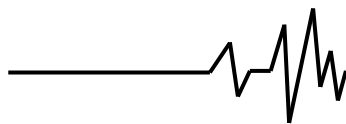


Рис. 1. Поверхня BSFC для трьохпаливної суміші'

Тиск у циліндрі також зростав: для B10E20D70 піковий тиск складав 8,65 МПа проти 8,11 МПа для D100, що відображає інтенсивніше горіння. Однак на низьких навантаженнях (25–50%) суміші з високим вмістом етанолу (>15%) демонстрували менш стабільне горіння через погіршення змішування, що підтверджується ширшою дисперсією даних тиску.



Щодо продуктивності, теплова ефективність (BTE) для сумішей B10E10D80 і B10E20D70 зростала на 1,5–3% порівняно з D100, особливо на повних навантаженнях (80–100%), досягаючи значень 38–40%. Це пов'язано з кращим використанням енергії завдяки кисню в паливі. Проте питома витрата палива (BSFC) зростала на 2–18% залежно від пропорцій: для B10E20D70 BSFC складав 260–280 г/кВт·год проти 230–240 г/кВт·год для D100. Зростання BSFC пояснюється нижчою теплотворною здатністю етанолу (26,8 МДж/кг) та біодизеля (37–39 МДж/кг) порівняно з дизелем (42–43 МДж/кг).

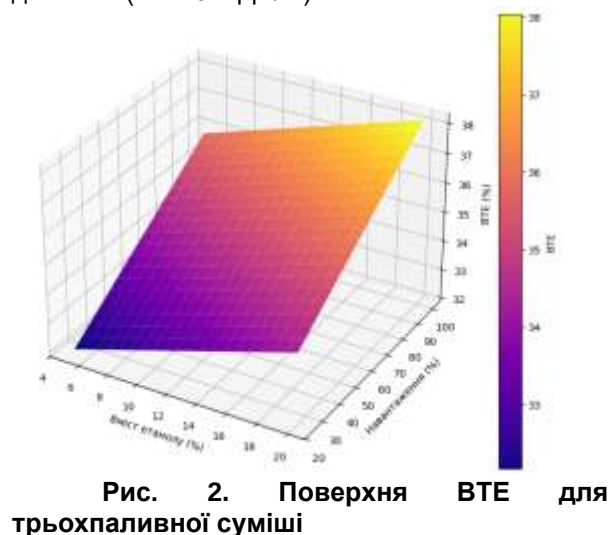


Рис. 2. Поверхня BTE для трьохпаливної суміші

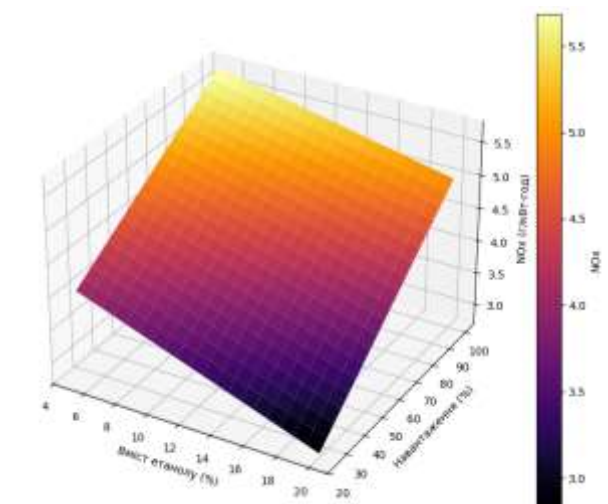


Рис. 3. Поверхня викидів NOx для трьохпаливної суміші

Екологічні показники є ключовою перевагою трьохпаливних сумішей. Викиди сажі зменшувалися на 15–50% залежно від вмісту етанолу: для B10E20D70 концентрація сажі падала до 0,02–0,03 г/кВт·год проти 0,05–0,07 г/кВт·год для D100. Це пов'язано з нижчим вмістом ароматичних вуглеводнів у біопаливах і кращим окисленням частинок. Викиди CO знизувалися на 20–40% (0,3–0,5 г/кВт·год для

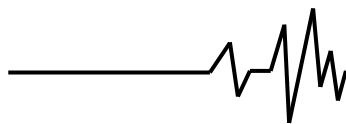
сумішей проти 0,7–1 г/кВт·год для D100), що відображає повніше згоряння. CO<sub>2</sub> зменшувався на 1–6%, але лише за умов оптимального співвідношення паливо/повітря. Викиди NOx демонстрували неоднозначну поведінку: на середніх навантаженнях (50–75%) вони знижувалися на 10–14% завдяки охолоджувальному ефекту етанолу, але на повних навантаженнях могли зростати на 5–10% через вищу температуру горіння (до 2100 K проти 1900 K для D100).

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Експериментальні дослідження режимів роботи дизельного двигуна на трьохпаливних сумішах дизельного палива, біодизеля та біоетанолу, проведені на стендових установках у період 2024–2025 років, підтверджують перспективність такого підходу для покращення екологічних і експлуатаційних характеристик. Сумісне використання біодизеля (10–20%) та біоетанолу (5–20%) у комбінації з дизелем дозволяє досягти помітного зменшення викидів шкідливих речовин: сажі на 15–50%, вуглецевого монооксиду на 20–40%, вуглекислого газу на 1–6% та оксидів азоту на 10–14% у певних режимах порівняно з роботою на чистому дизелі. Ці ефекти пояснюються наявністю кисню в молекулах біопалив, що сприяє повнішому окисленню, а також подовженою затримкою запалювання через низьке цетанове число етанолу, що посилює преміксову фазу горіння та зменшує утворення сажі.

Щодо характеристик горіння, спостережено зростання пікового тиску в циліндрі (до 8,65 МПа проти 8,11 МПа для дизеля) та швидкості тепловиділення (до 140 Дж/град), особливо на повних навантаженнях, що відображає інтенсивніше використання енергії палива. Теплова ефективність двигуна (BTE) підвищується на 1,5–3%, досягаючи 38–40% при оптимальних пропорціях (наприклад, B10E10D80 або B10E20D70). Однак питома витрата палива (BSFC) зростає на 2–18% через нижчу теплотворну здатність етанолу та біодизеля, що робить суміші менш економічними на низьких навантаженнях.

Аналіз залежностей параметрів від вмісту етанолу та навантаження, візуалізований поверхнями відповіді, показує, що максимальна ефективність і мінімальні викиди досягаються при 10–15% етанолу та високих навантаженнях (75–100%). На низьких навантаженнях можливе погіршення стабільності горіння та зростання неповних продуктів згоряння. Викиди NOx демонструють неоднозначну динаміку: зменшення на середніх навантаженнях завдяки охолоджувальному ефекту етанолу, але можливе зростання на повних через вищу температуру.

Практичне значення результатів полягає в можливості впровадження трьохпаливних



сумішей у сільськогосподарську техніку, вантажний транспорт та стаціонарні генератори без значних модифікацій двигуна. Це сприяє зниженню залежності від імпортного дизельного палива, зменшенню вуглецевого сліду та виконанню сучасних екологічних норм. Проте, для широкого застосування потрібні додаткові заходи: використання стабілізаторів для запобігання фазовому розділенню, тестування на холодний пуск і довговічність матеріалів паливної системи через потенційну корозію від етанолу, а також комбінація з системами EGR чи SCR для контролю NOx.

### Список використаних джерел

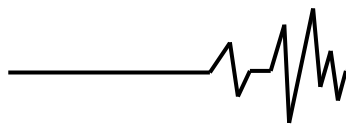
1. Марченко А. П., Гнатенко О. В. Дослідження основних техніко-експлуатаційних характеристик альтернативних видів палива для дизельних ДВЗ. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2018. № 2. С. 1-10. Доступно за: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/551>
2. Семенов В. Г. Біодизель в Україні чи з України? Дзеркало тижня. 2020. № 21. С. 12-15. Доступно за: [https://zn.ua/ukr/energy\\_market/biodizel\\_v\\_ukrayini\\_chi\\_z\\_ukrayini.html](https://zn.ua/ukr/energy_market/biodizel_v_ukrayini_chi_z_ukrayini.html)
3. Абдал-Бакі А. М. Перспективи використання етанолу та біоетанолу. Фізико-технічний інститут НТУУ "КПІ". 2015. С. 1-8. Доступно за: <http://ipt.kpi.ua/perspektivi-vikoristannya-etanolu-ta-bioetanolu>
4. Сацюк В. В. Трактори та автомобілі. Луцький національний технічний університет. 2018. Розділ 7. С. 1-15. Доступно за: [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/Трактори%20та%20авто%20\(Сацюк%20В.В.\)/LR/LR7/page1.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/Трактори%20та%20авто%20(Сацюк%20В.В.)/LR/LR7/page1.html)
4. Бауман М. Біодизельне паливо: монографія. Національний транспортний університет. 2010. 250 с.
5. Палій А. П., Білоїван О. В., Михальченко С. П., Корх І. В., Павліченко О. П. Використання біопалив у дизельних двигунах: огляд. Збірник наукових праць Інституту тваринництва НААН. 2022. Т. 2. С. 55-62. <https://example.nbu.gov.ua/reference>
6. Гнатенко О. В., Марченко А. П. Фізико-хімічні властивості біодизельного палива та його сумішей з етанолом. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 3. С. 45-52. Доступно за: <https://praci.vntu.edu.ua/similar-article-example>

### References

1. Marchenko A. P., Gnatenko O. V. Study of the main technical and operational characteristics of alternative fuels for diesel internal combustion engines. Scientific Works of Vinnytsia National Technical University. 2018. No. 2. P. 1-10. Available at: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/551> [in Ukrainian]
2. Semenov V. G. Biodiesel in Ukraine or from Ukraine? Mirror of the Week. 2020. No. 21. P. 12-15. Available at: [https://zn.ua/ukr/energy\\_market/biodizel\\_v\\_ukrayini\\_chi\\_z\\_ukrayini.html](https://zn.ua/ukr/energy_market/biodizel_v_ukrayini_chi_z_ukrayini.html) [in Ukrainian]
3. Abdal-Baki A. M. Prospects for the use of ethanol and bioethanol. Physical-Technical Institute of NTUU "KPI". 2015. P. 1-8. Available at: <http://ipt.kpi.ua/perspektivi-vikoristannya-etanolu-ta-bioetanolu> [in Ukrainian]
4. Satsiuk V. V. Tractors and automobiles. Lutsk National Technical University. 2018. Section 7. P. 1-15. Available at: [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib\\_upload/Трактори%20та%20авто%20\(Сацюк%20В.В.\)/LR/LR7/page1.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/Трактори%20та%20авто%20(Сацюк%20В.В.)/LR/LR7/page1.html) [in Ukrainian]
5. Bauman M. Biodiesel fuel: monograph. National Transport University. 2010. 250 p. [in Ukrainian]
6. Palii A. P., Biloyvan O. V., Mykhalchenko S. P., Korkh I. V., Pavlichenko O. P. Use of biofuels in diesel engines: review. Collection of scientific works of the Institute of Animal Husbandry NAAS. 2022. Vol. 2. P. 55-62. Available at: <https://example.nbu.gov.ua/reference> [in Ukrainian]
7. Gnatenko O. V., Marchenko A. P. Physico-chemical properties of biodiesel fuel and its mixtures with ethanol. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute. 2021. No. 3. P. 45-52. Available at: <https://praci.vntu.edu.ua/similar-article-example> [in Ukrainian]

### EXPERIMENTAL STUDIES OF OPERATING MODES OF A DIESEL ENGINE USING A THREE-FUEL MIXTURE

*The article is devoted to the review and analysis of experimental studies on the operation of diesel internal combustion engines using three-fuel (ternary) mixtures that include conventional diesel fuel, biodiesel (produced from vegetable oils, waste, or algae), and bioethanol. In the context of tightening environmental standards and the need to reduce dependence on fossil resources, the authors examine the impact of such mixtures on key engine*



operating modes: full and partial load, various speeds, start-up, and stability. Particular emphasis is placed on mixtures with proportions of 5-20% biodiesel and 5-20% bioethanol (for example, B10E10D80 or B10E20D70), which were tested on single- and multi-cylinder engines with turbocharging and direct injection.

Data on combustion characteristics are analyzed: prolongation of ignition delay due to the low cetane number of ethanol, increase in peak cylinder pressure and heat release rate (HRR), leading to more intensive premixed combustion. Performance indicators include an increase in brake thermal efficiency (BTE) by 1-4% and brake specific fuel consumption (BSFC) by 2-18%, depending on the mixture composition and load. Experiments using high-speed cameras and pressure sensors confirm a higher HRR peak and pressure closer to top dead center for ternary mixtures compared to pure diesel.

Special attention is paid to emissions: reduction of soot by 15-50%, CO by 20-40%, CO<sub>2</sub> by

1-6%, and NO by 11-14% in certain modes, although NO<sub>x</sub> may increase due to higher combustion temperatures at full loads. The results demonstrate that optimal mixtures (up to 15% ethanol) provide a balance between environmental friendliness and performance without significant engine modifications. The authors note risks such as possible phase separation of the mixture or the impact of ethanol on fuel system components and recommend additional tests for cold start and durability.

Overall, the article emphasizes the practical value of three-fuel mixtures for agricultural machinery, freight transport, and generators, contributing to the transition to sustainable energy sources. The obtained data are based on real bench tests and can serve as a basis for further optimization of fuel systems.

**Keywords:** three-fuel mixtures, diesel engine, biodiesel, bioethanol, experimental studies, emissions, combustion efficiency.

#### Відомості про авторів

**Бурлака Сергій Андрійович** – доктор філософії з галузевого машинобудування, доцент, доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>)

**Джеджула Олена Михайлівна** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

**Дячинська Олена Миколаївна** – асистент кафедри математики, фізики та комп'ютерних технологій, інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [olena.diachynska@gmail.com](mailto:olena.diachynska@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1856-3525>).

**Жарський Микола Миколайович** – аспірант Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail : [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>).

**Burlaka Serhii** – Doctor of Philosophy in Industrial Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in Agro-Industrial Complex at Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>).

**Dzhedzhula Olena** – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine).

**Diachynska Olena** – Assistant of the Department of Mathematics, Physics and Computer Technologies, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [olena.diachynska@gmail.com](mailto:olena.diachynska@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-1856-3525>).

**Zharskyi Mykola** - postgraduate student at Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: [ipserhiy@gmail.com](mailto:ipserhiy@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>).

Стаття надійшла 20.11.2025

Стаття прийнята 01.12.2025

Опубліковано 25.12.2025