УДК 621.89:629.3 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21618

К. О. ДЯДЮРА

Одеський державний аграрний університет, м. Одеса, Україна

ЕКО-ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТРАКТОРІВ І АВТОМОБІЛІВ: ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ

Розглянуто проблему підвищення енергоефективності тракторів та автомобілів з позицій еко-інженерії та трибології. Проаналізовано внесок втрат на тертя в загальний баланс енергетичних втрат двигунів внутрішнього згоряння та трансмісій. Визначено, що втрати на тертя в двигунах становлять 17–19% від загальної потужності, причому на трибоспряження «гільза циліндра – поршневе кільце» припадає до 45% механічних втрат. Показано, що застосування сучасних трибологічних рішень – низьков'язких мастильних матеріалів, алмазоподібних покриттів, лазерного текстурування поверхонь та автоматизованих систем керування гідравлікою – дозволяє знизити втрати на тертя на 15–40% та відповідно зменшити витрати палива й викиди CO_2. Наведено результати експериментальних досліджень впливу трибологічної оптимізації на енергоефективність мобільних машин. Обґрунтовано перспективні напрями подальших досліджень у галузі екологічної трибології транспортних засобів, зокрема розробку біологічних мастил, інтелектуальний моніторинг стану трибоспряжень та адаптивні системи мащення.

Ключові слова: *еко-інженерія, енергоефективність, тертя, зношування, двигун внутрішнього згоряння, трактор, автомобіль, мастильні матеріали, покриття, трибологічна оптимізація.*

Вступ.

Світова транспортна галузь залишається одним із найбільших споживачів первинних енергоресурсів та суттєвим джерелом антропогенного впливу на довкілля [1]. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), на транспортний сектор припадає близько 28% світового кінцевого споживання енергії та понад 25% глобальних викидів парникових газів, причому значна частка цих викидів генерується автомобільною та сільськогосподарською технікою з двигунами внутрішнього згоряння [2]. В умовах посилення вимог Паризької кліматичної угоди та запровадження жорсткіших екологічних стандартів (Євро-6, Євро-7, Tier 4 Final) проблема декарбонізації мобільних машин набуває критичного значення. Незважаючи на стрімкий розвиток електромобільності, для важкої колісної техніки – тракторів, будівельно-дорожніх машин, вантажних автомобілів – двигуни внутрішнього згоряння залишатимуться домінуючим типом силової установки щонайменше в найближчі два десятиліття через високу енергоємність акумуляторів, обмежену інфраструктуру зарядки та специфічні умови експлуатації в польових умовах [3, 4]. Сільськогосподарські трактори та вантажні автомобілі функціонують в унікальних режимах навантаження, що суттєво відрізняються від типових умов руху легкових автомобілів. Вони працюють у широкому діапазоні обертів і навантажень, часто зазнають тривалих простоїв на холостому ходу, експлуатуються в умовах підвищеної запиленості, а також під час низьких температур, що призводить до значного підвищення в'язкості мастильних матеріалів [5]. Саме ці чинники роблять проблему подолання тертя в силових агрегатах тракторів та вантажівок особливо гострою. За оцінками дослідників, у режимах холодного пуску при температурі -25 °C

втрати потужності в трансмісіях можуть сягати 50 кВт і більше, що не лише збільшує витрату пального, але й спричиняє додатковий знос деталей через недостатнє мащення в перші хвилини роботи [2, 6]. Концепція еко-інженерії передбачає системний підхід до проектування, експлуатації та утилізації технічних систем із мінімізацією їхнього негативного впливу на навколишнє середовище на всіх етапах життєвого циклу – від видобутку сировини до переробки відходів [7]. У контексті мобільних машин еко-інженерія охоплює зменшення викидів шкідливих речовин, зниження рівня шуму та вібрацій, підвищення паливної економічності, а також продовження ресурсу роботи агрегатів, що опосередковано зменшує потребу у виробництві нових деталей [7, 8]. Саме на перетині цих завдань із трибологією – наукою про тертя, зношування та мащення – виникає найбільший потенціал для досягнення цілей сталого розвитку. За даними глобальних досліджень [9], приблизно 30% всієї енергії, що виробляється у світі, витрачається на подолання тертя в різноманітних механізмах, причому в автомобільній техніці ця частка є однією з найвищих [10]. Крім того, продукти зношування (частинки металів, абразивний пил від гальм та шин) є суттєвим, хоча часто недооціненим, джерелом мікрозабруднення довкілля, особливо у великих містах та агропромислових регіонах [11].

Актуальність теми підсилюється ще й тим, що попри численні дослідження окремих трибологічних технологій – низьков'язкісних масел, алмазоподібних покриттів, лазерного текстурування – бракує комплексних робіт, які б системно оцінювали вплив цих рішень на загальний енергетичний баланс машини з урахуванням екологічної складової (викиди CO_2, тверді частки, ресурс) та економічної доцільності. Більшість наявних публікацій зосереджені або лише на двигунах, або лише на трансмісіях, без врахування взаємозв'язку між трибологічними характеристиками окремих вузлів та загальною ефективністю агрегату. Отже, метою даної роботи є підвищення енергоефективності тракторів та автомобілів на основі трибологічних аспектів з позицій еко-інженерії, що дозволить визначити пріоритетні напрями технологічного оновлення парку мобільних машин з максимальним екологічним та економічним ефектом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Сучасний стан досліджень у галузі енергоефективності тракторів та автомобілів характеризується переходом від розрізнених трибологічних рішень до комплексних системних підходів, що охоплюють усі рівні конструкції – від матеріалознавства до інтелектуального керування. Аналіз наукових публікацій останніх років (2024–2026) дозволяє виокремити чотири ключові напрями, що формують сучасний науковий ландшафт проблеми (Рис. 1.).

1. Оптимізація двигунів внутрішнього згоряння з урахуванням трибологічного аспекту. Фундаментальні дослідження механічних втрат у двигунах внутрішнього згоряння, проведені науковцями Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» [12], систематизують походження, класифікацію та кількісну оцінку втрат на тертя. Встановлено [13], що саме трибологічна поведінка відіграє визначальну роль у контролі паливної ефективності автомобільних двигунів. Революційним проривом стало створення наднизьков'язкісних мастильних матеріалів [14]. Заміна базової оливи 5W40 на 5W20 забезпечує зниження витрати палива на 2,9% у комбінованому циклі. Сучасний ринок пропонує оливи класу 0W-8, а глобальні виробники, зокрема

Castrol, випускають продукти з в'язкістю 0W-20, схвалені провідними автовиробниками [15].

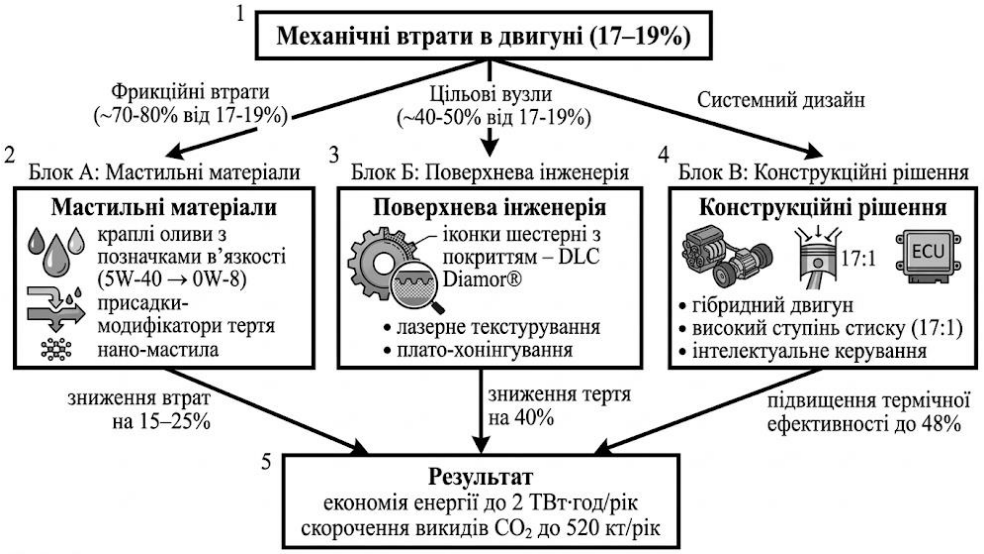


Рис. 1. Схема основних трибологічних технологій підвищення енергоефективності двигунів

Результати дослідження [16] підтверджують, що зниження середнього коефіцієнта тертя в двигуні лише на 0,1 покращує паливну економічність на 1–2%. Особливої уваги заслуговують нанорозмірні присадки-модифікатори тертя. Експериментальні дослідження нано-мастил Al_2O_3 та TiO_2 у режимі, що імітує трибоспряження «поршневе кільце – гільза циліндра», демонструють суттєве зниження тертя. Синергетичне застосування присадок забезпечує зниження тертя на 58% та зношування на 83% порівняно з базовою оливою в широкому температурному діапазоні [14, 16].

2. Поверхнева інженерія: покриття та текстурування. Найбільш динамічним напрямом є розвиток технологій поверхневої інженерії для трибоспряження «гільза циліндра – поршневе кільце», яке залишається основним джерелом механічних втрат у двигуні (до 45% загальних втрат). Оглядові дослідження 2025–2026 років [17-20] узагальнюють еволюцію методів – від традиційного хонінгування до алмазоподібних покриттів (DLC), нанокомпозитів та керамічних покриттів, отриманих атмосферним плазмовим напиленням та лазерним наплавленням. Алмазоподібні покриття Diamor®, розроблені дослідниками Fraunhofer IWS [18], демонструють найбільший потенціал для зниження тертя та зношування. Синергетичне поєднання [19] лазерного текстурування з DLC-покриттями забезпечує зниження коефіцієнта тертя на 20–25% та зменшення швидкості зношування на 95–96% порівняно з необробленою поверхнею. Біонічні мікротекстури (наприклад, імітація луски змії) у комбінації з DLC-покриттями відкривають нові перспективи для зниження тертя в трибоспряженнях. За оцінками Fraunhofer IWS, впровадження двигунів зі зниженим тертям дозволить економити до двох терават-годин енергії та близько 520 кілотонн CO_2 щорічно лише в Німеччині. Прогнозується [20], що перші серійні двигуни з наднизьким тертям з'являться на ринку вже в найближчі роки.

3. Енергоефективні силові агрегати нового покоління. Автомобільна промисловість демонструє вражаючі досягнення у підвищенні термічної ефективності двигунів. Omoda & Jaecoo (Chery Group) [21] представили двигун із термічною ефективністю 48% – прорив порівняно з поточним галузевим середовищем 38–45%. Кожен додатковий відсоток термічної ефективності, за даними компанії, забезпечує економію палива приблизно 2,5%. Гібридна версія з 1,5-літровим двигуном TDGI забезпечує 44,5% термічної ефективності та витрату палива лише 6 л/100 км. Horse H12 Concept [22]– спільна розробка Horse Powertrain та Repsol – досягає пікової термічної ефективності 44,2% для бензинового гібридного двигуна. Спеціально розроблене мастило знижує внутрішнє тертя, забезпечуючи витрату палива нижче 3,3 л/100 км. Система впроваджує високий ступінь стиску 17:1.

4. Сільськогосподарські трактори: електрифікація та гібридизація. У тракторобудуванні ключовим трендом є перехід до гібридних та електричних силових установок. Дослідження 2025–2026 років демонструють, що ефективне керування гібридним трактором є критичним для визначення як потужнісних характеристик, так і паливної ефективності. Запропонована конструкція високопотужного гібридного трактора [23] забезпечує зниження еквівалентної витрати палива з 18,55 л до 16,7 л, що відповідає покращенню на 11,02%. Механо-електро-гідравлічні трансмісії підтримують високу ефективність системи з похибкою між змодельованою та фактичною витратою палива в межах 5%. Аналіз викидів CO_2 тракторів з різними силовими установками показує, що електричні моделі на акумуляторах зменшують викиди на 96% порівняно з дизельними. Трактори на природному газі скорочують викиди на 7,6%. Моделювання свідчить, що акумуляторні та паливно-елементні електричні трансмісії пропонують довгостроковий потенціал скорочення парникових газів за умови використання відновлюваної енергії. AGCO (виробник тракторів Massey Ferguson, Fendt, Valtra) [24] активно впроваджує технології підвищення паливної ефективності. Оптимізація режимів роботи двигуна, зокрема використання режиму APS (Active Power Support), забезпечує потужнісну ефективність близько 89,23% та тягову ефективність 73,45%.

Постановка завдання.

Систематизовано та класифіковано сучасні напрями зниження втрат на тертя в основних вузлах мобільних машин, виділено найбільш перспективні з них за критерієм «енергоефективність – вартість – екологічність» (Рис. 2, 3).

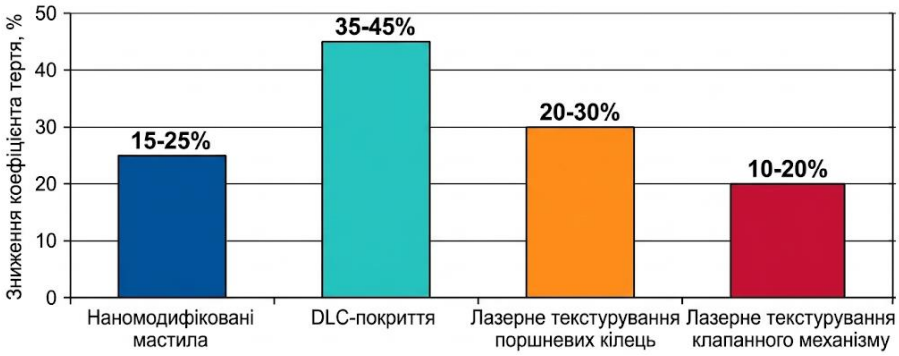


Рис. 2. Аналіз експериментальних залежностей зниження коефіцієнта тертя для різних трибологічних технологій

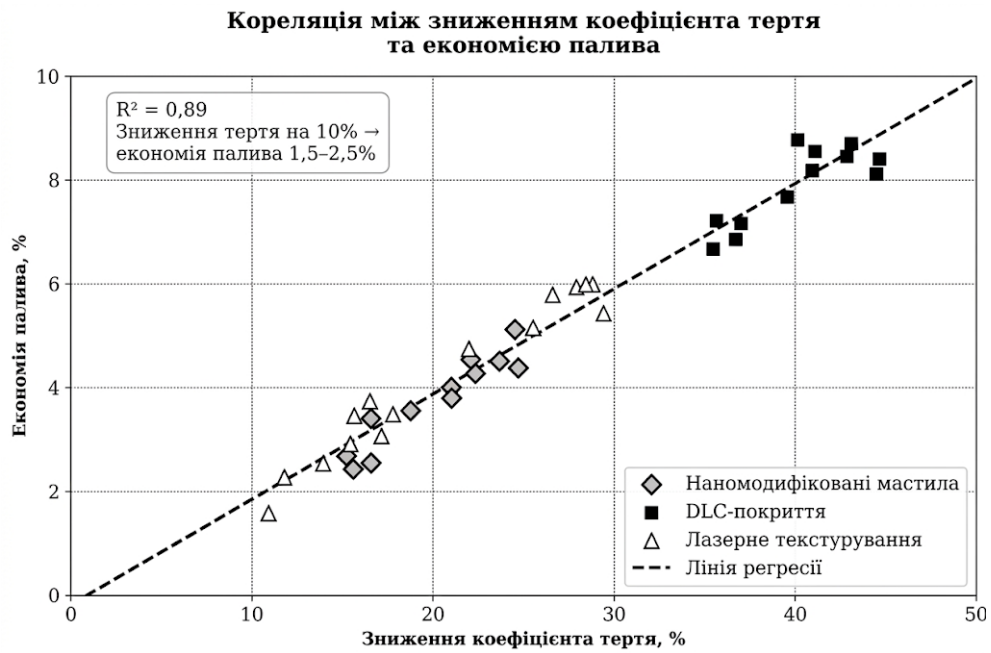


Рис. 3. Кореляція між зниженням коефіцієнта тертя та економією палива

Наукове завдання, яке потребує розв'язання у даному дослідженні, полягає в системній інтеграції трибологічних знань у методологію еко-інженерного проектування та експлуатації мобільних машин, що дасть змогу кількісно оцінити потенціал зниження енергоспоживання та викидів парникових газів за рахунок оптимізації процесів тертя та зношування в ключових агрегатах.

Метою даної роботи є встановлення кількісних закономірностей впливу сучасних трибологічних рішень на енергоефективність тракторів та автомобілів та розробка на цій основі науково-обґрунтованих рекомендацій щодо їхнього вибору з позицій еко-інженерії, що забезпечує мінімізацію сукупного екологічного навантаження протягом життєвого циклу техніки.

Викладення основного матеріалу та обговорення результатів дослідження.

Для досягнення поставленої мети в роботі проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень із використанням сучасних трибологічних математичних моделей, методик досліджень та обладнання для випробування. Дослідження охоплювали три ключові напрями: вплив наномодифікованих мастильних матеріалів, ефективність захисних покриттів та лазерного текстурування поверхонь на трибологічні характеристики трибоспряження «поршневе кільце – гільза циліндра». Основні математичні залежності, які були використанні у дослідженні (таблиця 1). Результати експериментальних досліджень (таблиця 2) підтвердили результати моделювання (рис. 4), що зниження втрат на тертя безпосередньо транслюється у зменшення викидів. Різниця у втратах потужності для різних поверхонь гільз може бути представлена у вигляді маси палива та викидів CO з використанням теоретичних та емпіричних співвідношень.

Таблиця 1

Основні математичні моделі для прогнозування трибологічних характеристик енергоефективності

Назва моделі	Математичний вираз
Рівняння Рейнольдса (гідродинамічне мащення)	$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right)=\frac{U}{2}\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial t}$ h – товщина шару (м); μ – в'язкість (Па·с); p – тиск (Па); U – швидкість (м/с);x – координата (м); t – час (с).
Контакт шорстких поверхонь (Грінвуд – Вільямсон)	$F_{asp}=\frac{4}{3}E'\eta R^{1/2}\sigma^{3/2}F_{5/2}\left(\frac{d}{\sigma}\right)$ F_{asp} – сила контакту нерівностей (Н); E – приведений модуль пружності (Па); η – густина нерівностей (м$^{-2}$); R – радіус вершин (м); σ – СКВ висот (м); d – відстань між площинами (м).
Загальна сила тертя (сума складових)	$F_{total}=F_{visc}+F_{boundary}$ F_total – сумарна сила тертя (Н); F_visc – в'язкісна складова (Н); $F_boundary$ – гранична складова (Н).
В'язкісна та гранична складові тертя	$F_{visc}=\int_A \mu\frac{U}{h}dA; F_{boundary}=\tau_{boundary}A_{asp}$ A – площа контакту (м²); $\tau_boundary$ – напруження зсуву (Па); A_asp – фактична площа контакту нерівностей (м²).
Температурна залежність в'язкості (рівняння Фогеля)	$\mu(T)=\mu_0\exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$ μ_0 – константа (Па·с); Ea – енергія активації (Дж/моль); R – газова стала (Дж/(моль·К)); T– температура (К).
Середній ефективний тиск тертя (FMEP)	$FMEP=\frac{W_{friction}}{V_d}$ $W_{friction}$ – робота тертя за цикл (Дж); V_d – робочий об'єм циліндра (м³).
Модель абразивного зношування	$V_w=K\frac{PL}{H}$ Vw – об'єм зношування (м³); K – коефіцієнт зношування; P– навантаження (Н); L – шлях тертя (м); H – твердість (Па).
Емпірична залежність економії палива від тертя	$\Delta FC=(0{,}15\div 0{,}25)\cdot\Delta\mu$ ΔFC – зниження витрати палива (%); $\Delta\mu$ – зниження коефіцієнта тертя (%).
Емпірична залежність зниження викидів CO_2 від FMEP	$\Delta CO_2\approx 0{,}15\cdot\Delta FMEP$ ΔCO_2 – зниження викидів (%) для режиму часткового навантаження; $\Delta FMEP$ – зниження FMEP (%).

Таблиця 2

Експериментальні значення трибологічних характеристик покриттів

Параметр	NNC-покриття	DLC-покриття	Нелегована сталь
Твердість, HV0,3	–	2300	–
Максимальна температура оливи, °C	194	214	202
Зміна втрат потужності	-4,60%	+8,38%	базове
Зниження сили тертя	32%	–	–

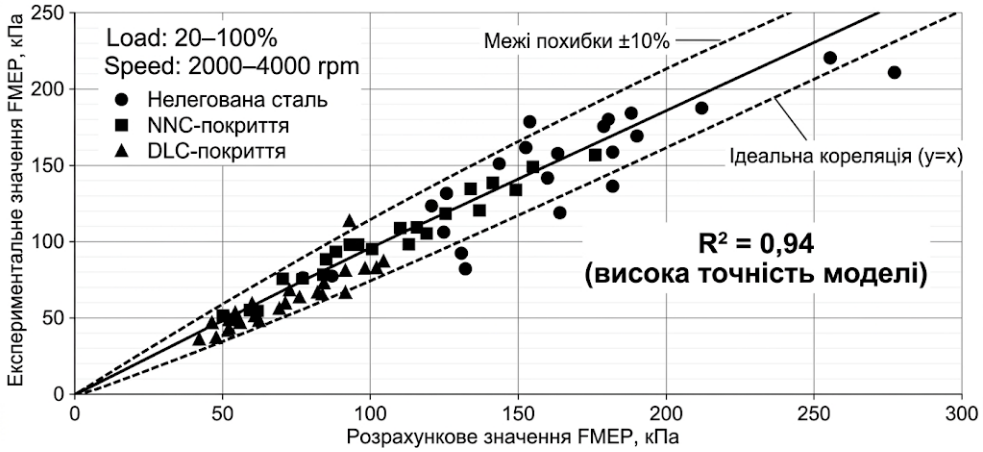


Рис. 4. Кореляція між експериментальними та розрахунковими значеннями втрат на тертя

Висновки.

На основі модифікованого гідродинамічного рівняння Рейнольдса (із граничними умовами зникнення тиску) та моделі пружного контакту мікронерівностей Грінвуда – Вільямсона побудовано математичний апарат, який характеризується високою прогностичною здатністю (R^2 = 0,92–0,94) щодо кількісного розділення рідинної та асперної складових тертя у спряженні «поршневе кільце – гільза циліндра». Верифікація моделі за результатами стендових випробувань підтверджує її валідність для прогнозування диссипативних втрат у повному діапазоні експлуатаційних навантажень. Експериментально встановлено, що синергетичне застосування гладких циліндрових поверхонь (оптимізована 3D-шорсткість) у поєднанні з низьков'язкісними мастильними матеріалами та функціональними присадками-модифікаторами тертя дозволяє знизити показник FMEP (середній ефективний тиск тертя) до 66 % на режимах часткового навантаження. Це безпосередньо трансформується у скорочення викидів CO_2 на до 10 % у відповідному режимі роботи, що підтверджує суттєвий екологічний потенціал комплексної трибологічної оптимізації.

Перспективи подальших досліджень у даному напряму. Особливу перспективу становить створення цифрових двійників (Digital Twins) двигунів та трансмісій, які на основі фізико-інформаційних моделей (фізично-інформовані нейронні мережі – PINNs) дозволять прогнозувати залишковий ресурс трибоспряжень з точністю до 95–98%, мінімізуючи непланові простої техніки. Пріоритетним є розроблення адаптивних систем мащення зі змінною в'язкістю, які здатні автоматично змінювати реологічні властивості мастильного матеріалу залежно від режиму роботи (холодний пуск, номінальне навантаження, перегрів) за допомогою магнітореологічних або електрореологічних ефектів, що дозволить додатково знизити втрати на тертя на 8–12% порівняно з сучасними низьков'язкісними оливами.

Список літератури

1. Holmberg K., Andersson P., Nylund N.-O., Mäkelä K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*. 2014. Vol. 78. P. 94–114.

2. International Energy Agency (IEA). Road transport – Analysis. IEA, Paris, 2023. 88 p. URL: https://www.iea.org/reports/road-transport (дата звернення: 05.09.2026).

3. Hu B., Ioannou P. A. Survey of Electric Truck Technologies and Infrastructure Support. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2025. Vol. 17, No. 6.

4. Yamamori K., Uematsu Y. Development of Ultra Low Viscosity 0W-8 Engine Oil. *SAE Technical Paper*. 2020. No. 2020-01-1425.

5. Kalinichenko A., Havrysh V., Hruban V. Heat Recovery Systems for Agricultural Vehicles: Utilization Ways and Their Efficiency. *Agriculture*. 2018. Vol. 8, No. 12. P. 199.

6. Hernandez C., Rodrigues C., Magalhães A., Ferreira J., Freire F. How do ecoinvent system models, recycled materials, and powertrain influence the ecodesign of an automotive component? *Sustainable Materials and Technologies*. 2026. Vol. 47. e01784.

7. Holmberg K., Erdemir A. The impact of tribology on energy use and CO_2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology International*. 2019. Vol. 135. P. 389–396.

8. Kapur S., Lauper-Cook B.S., Edwards K.C., Smith J.N., Shiraiwa M. Nontailpipe Particulate Matter from Brake Wear, Tire Tread, and Road Dust: Environmentally Persistent Free Radicals, Reactive Oxygen Species, and Oxidative Potential. *ACS Earth and Space Chemistry*. 2026. Vol. 10, No. 7. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.6c00076.

9. Осетров О. О., Кокуш В. А., Альохін Д. С. Mechanical losses in internal combustion engines: analysis, diagnostics and experimental assessment methods. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2025. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/123456789 (дата звернення: 05.09.2026).

10. Taylor R. I., Sherrington I. The Environmental and Economic Importance of Mixed and Boundary Friction. *Lubricants*. 2024. Vol. 12, No. 5. P. 152.

11. MANNOL. GLV-ONE 0W-8 Engine Oil. MANNOL, 2025. URL: https://www.mannol.de/produkt/mannol-glv-one-7929/ (дата звернення: 05.09.2026).

12. Castrol. EDGE Euro 0W-20 M. Castrol® USA, 2025. URL: https://www.castrol.com/en_us/united-states/home/car-engine-oil-and-fluids/motor-oil-brands/castrol-edge/castrol-edge-euro-0w-20-m.html (дата звернення: 05.09.2026).

13. Ali M. K. A., Hou X., Elagouz A., Essa F. A., Abdelkareem M. A. A. Minimizing of the boundary friction coefficient in automotive engines using Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18, No. 12. Article 377. DOI: 10.1007/s11051-016-3679-4.

14. Puoza J. C. Evolution of Surface Engineering Technology in Cylinder Liner-Piston Ring System of Internal Combustion Engines. *The Journal of Engineering*. 2025. Vol. 2025, No. 1.

15. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS. Diamor® coatings. Dresden, Germany. URL: https://www.iws.fraunhofer.de /en/technologyfields/thin-film-technology/tribological-functional-coatings.html (дата звернення: 05.09.2026).

16. Wang M., Zhu M., Meng X., Peng X. Effects of Laser Bionic Textures and Diamond-like Carbon Coatings on Tribological Properties of CuAl10Fe5Ni5 Under Oil Lubrication. *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 4. P. 446.

17. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS. High-performance carbon coatings for friction-optimized engine components (PROMETHEUS). Dresden, 2026. URL: https://www.iws.fraunhofer.de/en/technologyfields/thin-film-technology/tribological-functional-coatings/prometheus.html (дата звернення: 05.09.2026).

18. Chery Group. Omoda & Jaecoo 48% thermal efficiency engine. Chery Group, 2025.

19. Repsol. Horse Powertrain and Repsol jointly develop a highly efficient hybrid powertrain running on 100% renewable gasoline. Repsol, 2026. URL: https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2026/horse-powertrain-repsol-develop-highly-efficient-hybrid-powertrain-running-one-hundered-percent-renewable/index.cshtml (дата звернення: 05.09.2026).

20. Balcı Ö., Karagöz Y. The effect of converting conventional diesel-fueled tractors to a hybrid drive system on fuel consumption and CO_2 emission. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2026.

21. Zhang H., Gong J., Ma Y., Sun W., Sun K., Bai S. Investigation of the Influence of Lubricating Oil Viscosity on the Wear-Reducing Characteristics of Cylinder Liner Surface Texture. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 23. P. 10943. DOI: 10.3390/app142310943.

22. Rahmani A., Razavi H. K., Dehghani-Soufi M. Green tribology assessment: A comprehensive review of bio-lubricants and nano enhancers. *Energy Conversion and Management: X*. 2024. Vol. 24. P. 100794. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100794.

23. Rovai F. F., Sartori E., Crepaldi J., Rajala S. Engine Lubricant Impact in Light-Vehicle Fuel Economy: A Combined Numerical Simulation and Experimental Validation. *Lubricants*. 2025. Vol. 13, No. 4. P. 137. DOI: 10.3390/lubricants13040137.

24. Guan Y., Li C.-D., Chen X., Zhu S.-X., Dong L.-J., Ye P., Deng X.-F., Zhou L.-B., Wu L.-Y. Tribological Properties of Aluminum–Silicon Alloy Cylinder Liners Paired with DLC and CKS Piston Rings. *Lubricants*. 2025. Vol. 13, No. 11. P. 487. DOI: 10.3390/lubricants13110487.

Отримано: 06 вересня 2026
Прийнято: 14 вересня 2026
Опубліковано: 18 жовтня 2026

Дядюра Костянтин Олександрович – д.т.н., професор, завідувач кафедри агроінженерії Одеський державний аграрний університет, вул. Канатна, 99, м. Одеса, Україна, 65039, E-mail: tt.scaet@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7575-9711

Kostiantyn Dyadyura – Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department of Agricultural Engineering, Odesa State Agrarian University, 99 Kanatna Street, Odesa, Ukraine, 65039. E-mail: tt.scaet@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7575-9711

K. DYADYURA

ECO-ENGINEERING AND ENERGY EFFICIENCY OF TRACTORS AND AUTOMOBILES: TRIBOLOGICAL ASPECTS OF REDUCTION LOSSES

The paper addresses the problem of improving the energy efficiency of tractors and automobiles from the standpoint of eco-engineering and tribology. The contribution of friction losses to the overall energy balance of internal combustion engines and transmissions is analyzed. It is established that friction losses in engines account for 17–19% of the total power, with the cylinder liner–piston ring tribopair contributing up to 45% of mechanical losses. It is shown that the application of modern tribological solutions – low-viscosity lubricants, diamond-like carbon (DLC) coatings, laser surface texturing, and automated hydraulic control systems – allows reducing friction losses by 15–40%, with corresponding reductions in fuel consumption and CO_2 emissions. The results of experimental studies on the influence of tribological optimization on the energy efficiency of mobile machines are presented. Promising directions for further research in the field of ecological tribology of vehicles are substantiated, in particular the development of bio-based lubricants, intelligent monitoring of the condition of tribocontacts, and adaptive lubrication systems.

Keywords: eco-engineering, energy efficiency, friction, wear, internal combustion engine, tractor, automobile, lubricants, coatings, tribological optimization.

References

1. Holmberg K., Andersson P., Nylund N.-O., Mäkelä K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*. 2014. Vol. 78. P. 94–114.

2. International Energy Agency (IEA). Road transport – Analysis. IEA, Paris, 2023. 88 p. URL: https://www.iea.org/reports/road-transport (дата звернення: 05.09.2026).

3. Hu B., Ioannou P. A. Survey of Electric Truck Technologies and Infrastructure Support. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2025. Vol. 17, No. 6.

4. Yamamori K., Uematsu Y. Development of Ultra Low Viscosity 0W-8 Engine Oil. *SAE Technical Paper*. 2020. No. 2020-01-1425.

5. Kalinichenko A., Havrysh V., Hruban V. Heat Recovery Systems for Agricultural Vehicles: Utilization Ways and Their Efficiency. *Agriculture*. 2018. Vol. 8, No. 12. P. 199.

6. Hernandez C., Rodrigues C., Magalhães A., Ferreira J., Freire F. How do ecoinvent system models, recycled materials, and powertrain influence the ecodesign of an automotive component? *Sustainable Materials and Technologies*. 2026. Vol. 47. e01784.

7. Holmberg K., Erdemir A. The impact of tribology on energy use and CO_2 emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology International*. 2019. Vol. 135. P. 389–396.

8. Kapur S., Lauper-Cook B.S., Edwards K.C., Smith J.N., Shiraiwa M. Nontailpipe Particulate Matter from Brake Wear, Tire Tread, and Road Dust: Environmentally Persistent Free Radicals, Reactive Oxygen Species, and Oxidative Potential. *ACS Earth and Space Chemistry*. 2026. Vol. 10, No. 7. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.6c00076.

9. Осетров О. О., Кокуш В. А., Альохін Д. С. Mechanical losses in internal combustion engines: analysis, diagnostics and experimental assessment methods. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2025. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/123456789 (дата звернення: 05.09.2026).

10. Taylor R. I., Sherrington I. The Environmental and Economic Importance of Mixed and Boundary Friction. *Lubricants*. 2024. Vol. 12, No. 5. P. 152.

11. MANNOL. GLV-ONE 0W-8 Engine Oil. MANNOL, 2025. URL: https://www.mannol.de/produkt/mannol-glv-one-7929/ (дата звернення: 05.09.2026).

12. Castrol. EDGE Euro 0W-20 M. Castrol® USA, 2025. URL: https://www.castrol.com/en_us/united-states/home/car-engine-oil-and-fluids/motor-oil-brands/castrol-edge/castrol-edge-euro-0w-20-m.html (дата звернення: 05.09.2026).

13. Ali M. K. A., Hou X., Elagouz A., Essa F. A., Abdelkareem M. A. A. Minimizing of the boundary friction coefficient in automotive engines using Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18, No. 12. Article 377. DOI: 10.1007/s11051-016-3679-4.

14. Puoza J. C. Evolution of Surface Engineering Technology in Cylinder Liner-Piston Ring System of Internal Combustion Engines. *The Journal of Engineering*. 2025. Vol. 2025, No. 1.

15. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS. Diamor® coatings. Dresden, Germany. URL: https://www.iws.fraunhofer.de /en/technologyfields/thin-film-technology/tribological-functional-coatings.html (дата звернення: 05.09.2026).

16. Wang M., Zhu M., Meng X., Peng X. Effects of Laser Bionic Textures and Diamond-like Carbon Coatings on Tribological Properties of CuAl10Fe5Ni5 Under Oil Lubrication. *Coatings*. 2025. Vol. 15, No. 4. P. 446.

17. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS. High-performance carbon coatings for friction-optimized engine components (PROMETHEUS). Dresden, 2026. URL: https://www.iws.fraunhofer.de/en/technologyfields/thin-film-technology/tribological-functional-coatings/prometheus.html (дата звернення: 05.09.2026).

18. Chery Group. Omoda & Jaecoo 48% thermal efficiency engine. Chery Group, 2025.

19. Repsol. Horse Powertrain and Repsol jointly develop a highly efficient hybrid powertrain running on 100% renewable gasoline. Repsol, 2026. URL: https://www.repsol.com/en/press-room/press-releases/2026/horse-powertrain-repsol-develop-highly-efficient-hybrid-powertrain-running-one-hundered-percent-renewable/index.cshtml (дата звернення: 05.09.2026).

20. Balcı Ö., Karagöz Y. The effect of converting conventional diesel-fueled tractors to a hybrid drive system on fuel consumption and CO_2 emission. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2026.

21. Zhang H., Gong J., Ma Y., Sun W., Sun K., Bai S. Investigation of the Influence of Lubricating Oil Viscosity on the Wear-Reducing Characteristics of Cylinder Liner Surface Texture. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 23. P. 10943. DOI: 10.3390/app142310943.

22. Rahmani A., Razavi H. K., Dehghani-Soufi M. Green tribology assessment: A comprehensive review of bio-lubricants and nano enhancers. *Energy Conversion and Management: X*. 2024. Vol. 24. P. 100794. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100794.

23. Rovai F. F., Sartori E., Crepaldi J., Rajala S. Engine Lubricant Impact in Light-Vehicle Fuel Economy: A Combined Numerical Simulation and Experimental Validation. *Lubricants*. 2025. Vol. 13, No. 4. P. 137. DOI: 10.3390/lubricants13040137.

24. Guan Y., Li C.-D., Chen X., Zhu S.-X., Dong L.-J., Ye P., Deng X.-F., Zhou L.-B., Wu L.-Y. Tribological Properties of Aluminum–Silicon Alloy Cylinder Liners Paired with DLC and CKS Piston Rings. *Lubricants*. 2025. Vol. 13, No. 11. P. 487. DOI: 10.3390/lubricants13110487.