

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ СПУСКУ І ПІДЙОМАХ

Стаття присвячена актуальним проблемам вдосконалення двигунів внутрішнього згоряння на основі аналітичних розрахунків у сучасних умовах зростання вимог до їх ефективності, екологічності та надійності. Попри активний розвиток електромобільності та альтернативних джерел енергії, двигуни внутрішнього згоряння продовжують відігравати провідну роль у транспортній галузі, що зумовлює необхідність їх подальшого вдосконалення. Основну увагу приділено аналізу причин низького ККД сучасних двигунів, серед яких теплові втрати, механічне тертя та неповне згоряння палива, а також екологічним аспектам їх роботи. Показано, що двигуни внутрішнього згоряння є значним джерелом токсичних викидів — NO_x , CO , вуглеводнів, альдегідів та твердих частинок, які становлять небезпеку для здоров'я людини та довкілля. Проаналізовано сучасні наукові підходи до підвищення ефективності та екологічної безпеки двигунів внутрішнього згоряння, включаючи цифрову діагностику, використання вейвлет-аналізу, створення цифрових двійників, а також розвиток багатотактних і гібридних силових установок. Наведено порівняльні норми викидів для дизельних двигунів відповідно до різних стандартів Євро, що демонструють поступове посилення екологічних вимог. Основна увага приділена підвищенню енергетичної ефективності, зниженню шкідливих викидів та аналізу руху транспортних засобів при різних умовах експлуатації. Основним напрямком дослідження є аналіз роботи двигуна при русі транспортного засобу з гори та під гору. Показано, що аналіз руху транспортного засобу під ухилом і на підйом дає можливість краще усвідомити його динаміку в різних умовах, оптимізувати роботу та підвищити загальну ефективність. Отримані результати можуть бути корисними для створення нових моделей транспортних засобів, удосконалення й модернізації вже наявних конструкцій, а також для підготовки операторів.

Ключові слова: Двигун внутрішнього згоряння, ефективність, економічність, аналітичні розрахунки, зниження шкідливих викидів.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток автомобільної промисловості та транспорту супроводжується зростанням вимог до ефективності, екологічності та надійності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Незважаючи на активний розвиток альтернативних джерел енергії, таких як електромобілі та водневі паливні елементи, ДВЗ продовжують залишатися основним джерелом енергії для транспортних засобів. Однак їх експлуатація супроводжується низкою проблем, пов'язаних із енергетичною ефективністю, екологічним впливом та технічним станом. Це обумовлює необхідність постійного вдосконалення конструкції, робочих процесів та методів діагностики ДВЗ [1].

Однією з ключових проблем сучасних ДВЗ є низький коефіцієнт корисної дії (ККД), який обмежений термодинамічними законами. Значна частина енергії, що виділяється при згорянні палива, втрачається через теплові втрати, механічне тертя та неповне згоряння палива [2]. Це призводить до зниження економічності двигунів та збільшення витрат на паливо. Крім того, ДВЗ є основним джерелом шкідливих викидів, таких як оксиди азоту (NO_x), вуглекислий газ (CO_2), вуглеводні (СН) та тверді частинки (сажа) [3]. Ці викиди негативно впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей, що обумовлює необхідність розробки нових методів зниження токсичності вихлопних газів.

Іншою важливою проблемою є забезпечення надійності та довговічності ДВЗ. З часом технічний стан двигунів погіршується через знос деталей, накопичення відкладень у системах

живлення та згоряння, а також через неправильну експлуатацію. Це призводить до зниження продуктивності, збільшення витрат на обслуговування та ризику раптових відмов [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні методи діагностики, такі як візуальний огляд та вимірювання основних параметрів, часто є недостатньо точними та не дозволяють виявити проблеми на ранніх стадіях. Тому актуальним є розробка нових методів діагностики, зокрема з використанням цифрових технологій, таких як цифрові двійники та вейвлет-аналіз [4, 6]. Сучасні дослідження спрямовані на розробку нових конструкцій ДВЗ, таких як п'яти- та шеститактні двигуни, які мають потенціал для підвищення ефективності за рахунок додаткових тактів роботи [7-9]. Також активно розвиваються гібридні технології, де ДВЗ працює в парі з електродвигуном, що дозволяє знизити викиди та підвищити паливну економічність [10]. Однак впровадження таких технологій вимагає значних інвестицій та додаткових досліджень для оптимізації їх роботи.

Важливим аспектом є оптимізація теплового балансу ДВЗ, який визначає розподіл енергії між корисними роботами та втратами. Значна частина теплоти втрачається через вихлопні гази, охолодження та механічне тертя [2]. Для підвищення ефективності необхідно розробляти нові методи рекуперації тепла, такі як використання термоелектричних генераторів або систем рекуперації енергії з вихлопних газів [3]. Крім того, важливим є впровадження легких матеріалів, таких як алюміній та композити, що дозволяє знизити масу двигуна та покращити його енергоефективність. Зростання обсягів автомобілізації призводить до збільшення викидів шкідливих речовин, що становить серйозну загрозу для навколишнього середовища. Згідно з сучасними стандартами, такими як Євро-6, вимоги до екологічності ДВЗ постійно зростають [3]. Це вимагає розробки нових методів очищення вихлопних газів, таких як каталітичні нейтралізатори, сажові фільтри та системи селективного каталітичного відновлення (SCR). Однак їх впровадження супроводжується збільшенням вартості двигунів та складністю їх обслуговування. Окрім викидів, ДВЗ є джерелом шумового забруднення, яке негативно впливає на здоров'я людей та комфорт у міських умовах. Рівень шуму двигунів залежить від їх конструкції, режимів роботи та стану [3]. Для зниження шуму необхідно впроваджувати нові методи звукоізоляції, такі як використання спеціальних матеріалів та конструкцій глушників.

Досягнення науки і техніки ХХІ століття значно розширили можливості людини впливати на навколишнє середовище. Інтенсивний розвиток автомобілізації у всьому світі спричинив значне забруднення повітря вихлопними газами, особливо небезпечне в міських і промислових районах, а також уздовж транспортних магістралей. Це стало причиною виникнення нової науки – екології. Автомобільні поршневі двигуни внутрішнього згоряння порушують екологічну рівновагу в природі через викиди шкідливих речовин та акустичне випромінювання (шум) під час роботи. Основні складові викидів: вихлопні гази (ВГ), що містять продукти згоряння пального, картерні гази та паливні випаровування. При цьому 95...99 % шкідливих викидів сучасних автомобільних двигунів припадає на ВГ. Загалом у складі ВГ виявлено понад 280 компонентів. До групи нетоксичних речовин належать азот, кисень, водень, водяна пара, вуглекислий газ. Токсичними називають речовини, що негативно впливають на організм людини та навколишнє середовище. До групи токсичних речовин входять: оксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO_x), вуглеводні (C_nH_m), альдегіди (R•CHO), сажа, діоксид сірки (SO₂), сірководень (H₂S), токсичні сполуки свинцю, канцерогенні вуглеводні (наприклад, бензапірен, як один із найактивніших). Оксид вуглецю (CO, чадний газ) – прозорий, без запаху, легший за повітря, нерозчинний у воді. Його поглинальна здатність у 240 разів вища, ніж у кисню. Вступаючи в реакцію з гемоглобіном крові, CO блокує його здатність транспортувати кисень, що може призвести до смертельного отруєння. Оксиди азоту (NO, NO₂) – газ червоно-бурого кольору, добре розчиняється у воді з утворенням кислот. Небезпека впливу оксидів азоту полягає в тому, що отруєння організму проявляється

поступово, і специфічних засобів нейтралізації не існує. Сажа – тверді частинки вуглецевих сполук із вмістом чистого вуглецю до 99 %. Вона є механічним забруднювачем легень людини, але ще небезпечніша як адсорбент канцерогенних речовин (наприклад, бензапірену), що може спричинити рак легень. Альдегіди ($R \cdot CHO$) мають різкий неприємний запах, уражають печінку, нирки, слизові оболонки. Особливо небезпечні вони у викидах транспорту в підземних виробках. З метою обмеження негативного впливу автомобільних викидів на навколишнє середовище національні стандарти регламентують їх гранично допустимі концентрації (ГДК) у робочій зоні та атмосфері, а також допустимі масові викиди. Технології та вимоги до екологічної безпеки постійно розвиваються, і старі стандарти як наприклад ГОСТ Р 51206–98 перестають відповідати сучасним реаліям. Таким чином, основним завданням сучасних досліджень у галузі ДВЗ є підвищення їх ефективності, зниження екологічного впливу та забезпечення надійності. Для цього необхідно розробляти нові методи діагностики, оптимізувати тепловий баланс, впроваджувати інноваційні конструкції та технології, а також забезпечувати дотримання сучасних екологічних стандартів. Вирішення цих проблем дозволить не лише покращити експлуатаційні характеристики ДВЗ, але й забезпечити їх конкурентоспроможність в умовах переходу до альтернативних джерел енергії.

Викиди для автомобільних дизелів, показані в таблиці 1. Дані для стандарту Євро VII наразі ще остаточно не встановлені, оскільки цей стандарт перебуває на стадії розробки. Зверніть увагу, що з кожним новим стандартом Євро вимоги до викидів шкідливих речовин стають суворішими, що сприяє зменшенню негативного впливу автомобілів на довкілля. Норми димності відпрацьованих газів для автомобільних дизелів встановлюються стандартом. Димність відпрацьованих газів вимірюють на режимах зовнішньої швидкісної характеристики двигуна та на режимі вільного прискорення. Проблема зниження токсичності та димності ВГ ускладнюється тим, що зазвичай необхідно зменшити викид кількох токсичних компонентів. Однак багато методів, що знижують викид продуктів неповного згоряння вуглецю, пов'язані з інтенсифікацією процесу згоряння, що спричиняє збільшення концентрації NO_x . Реалізація низки способів зменшення викидів NO_x призводить до погіршення паливної економічності двигуна.

Таблиця 1 – Нормування шкідливих викидів автомобілів із дизельними двигунами
[**Ошибка! Закладка не определена.**]

Норми токсичності	Викиди, г/(кВт • год) (визначено по 13ступінчастому циклу)			
	NO_x	CO	CH	Частинки
Євро I	8,0	4,5	1,1	0,34
Євро II	7,0	4,0	1,1	0,15
Євро III	5,0	2,1	0,66	0,10
Євро IV	3,5	1,5	0,46	0,02
Євро V	2,0	1,5	0,46	0,02
Євро VI	0,4	1,5	0,13	0,01
Євро VII	0,23	1,5	0,13	0,01

Мета статті полягає у дослідженні і аналізі роботи двигуна при русі транспортного засобу з гори та під гору.

Основний матеріал дослідження. Останнім часом, коли дизельні та бензинові палива сильно піднялися в ціні, а це істотно впливає на вартість вирощеної продукції або матеріалу, що перевозиться, транспортні та сільськогосподарські підприємства почали дуже сильно економити паливо, мастильні матеріали та моторесурс сільськогосподарської техніки. Другий закон Ньютона, який свідчить, що:

Транспортні технології

$$F = ma \quad (1),$$

де F – сила, МПа;

m — маса динамічного транспортного засобу із заправкою та водієм, кг;

a – прискорення під час руху, м/с^2 .

F , m , a залежить від швидкості руху V , тобто. $F(V)$, $m(V)$, $a(V)$.

Для переходу до диференціального рівняння руху транспортного засобу (по полю – трактор, по дорозі – автомобіль), необхідно врахувати всі основні сили, що діють на транспортний засіб, такі як сила тяги $F_{\text{тяги}}$, сила опору руху $F_{\text{оп}}$, сила тертя та інші можливі фактори.

$$F = F_{\text{тяги}} - F_{\text{оп}} = ma \quad (2)$$

$$F_{\text{оп}} = kV,$$

$$a = \frac{dV}{dt}.$$

де k – коефіцієнт опору, параметр залежить від умов руху (типу ґрунту, опору коченню тощо), кг/с ;

t – час, с;

V – швидкість, м/с .

Розглянемо спрощену модель руху транспортного засобу. Відповідно до наших припущень рівняння (1), тоді рівняння в диференціальній формі набуде вигляду:

$$F_{\text{тяги}} = kV + m \frac{dV}{dt}; V(0) = 0. \quad (2')$$

Отриману задачу Коші (2') можна вирішувати аналітично, використовуючи інтегрування та вирішуючи просте лінійне диференціальне рівняння 1-го порядку.

Сили опору коченню та аеродинамічний опір при невеликій швидкості трактора незначні тому ними можна знехтувати.

Тоді загальне рішення неоднорідного рівняння запишеться як

$$V(t) = e^{-\int \frac{k}{m} dt} \cdot \left[\int \frac{F_{\text{тяги}}}{m} e^{\int \frac{k}{m} dt} dt + C \right]. \quad (3)$$

Розкриємо інтеграли

$$\begin{aligned} e^{-\int \frac{k}{m} dt} &= e^{-\frac{k}{m} \int dt} = e^{-\frac{k}{m} t}; \\ \int \frac{F_{\text{тяги}}}{m} e^{\int \frac{k}{m} dt} dt &= \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \int e^{\int \frac{k}{m} dt} dt = \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \int e^{\frac{k}{m} t} dt = \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \int e^{\frac{k}{m} t} d\left(\frac{k}{m} t\right) \left(\frac{m}{k}\right) = \\ &= \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \left(\frac{m}{k}\right) \int e^{\frac{k}{m} t} d\left(\frac{k}{m} t\right) = \frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m} t} + C. \end{aligned}$$

Тоді загальне рішення диференціального рівняння руху набуває вигляду:

$$V(t) = e^{-\frac{k}{m} t} \cdot \left[\frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m} t} + C \right].$$

Задовольняючи початкові умови отримаємо приватне рішення завдання Коші, тобто. математичну модель руху транспортного засобу – автомобіля чи трактора. Підставимо до рішення (3) початкову умову $V(0) = 0$, тобто

$$0 = e^{-\frac{k}{m}t} \cdot \left[\frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m}t} + C \right] = \frac{F_{\text{тяги}}}{k} + C \text{ звідки } C = -\frac{F_{\text{тяги}}}{k}.$$

Тоді приватне рішення нашого математичного завдання набуде вигляду

$$V(t) = e^{-\frac{k}{m}t} \cdot \left[\frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m}t} - \frac{F_{\text{тяги}}}{k} \right] = e^{-\frac{k}{m}t} \cdot \frac{F_{\text{тяги}}}{k} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right].$$

Остаточне вирішення завдання Коші набуде вигляду

$$V(t) = \frac{F_{\text{тяги}}}{k} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right]. \quad (4)$$

Тобто, швидкість руху транспортного засобу залежить від часу t , опору ґрунту k і тяги транспортного засобу. Дане рівняння описує рух транспортного засобу рівною стандартною поверхнею поля або дороги.

Якщо трактор рухається по пухкому полю, тоді ми підбираємо коефіцієнт опору $k_{\text{п}}$. та отримуємо залежність:

$$V_{\text{п}}(t) = \frac{F_{\text{тяги п.}}}{k_{\text{п}}} \cdot e^{-\frac{k_{\text{п}}}{m}t} \left[e^{\frac{k_{\text{п}}}{m}t} - 1 \right]. \quad (4')$$

При русі трактора по пухкому ґрунту збільшується сила опору руху до $k_{\text{п}}$, сила тяги може зменшуватися через пробуксовування провідних коліс. Якщо $k_{\text{п}} > k$, то збільшується коефіцієнт опору для пухкого ґрунту, якщо навпаки $k_{\text{п}} < k$ зменшується коефіцієнт опору для пухкого ґрунту, тим самим зменшується навантаження на тягу. Зміниться і швидкість руху. Крім руху транспортного засобу по пухкому ґрунту велике значення відіграє навантаження на двигун при русі транспортного засобу на підйом (у гору) та аналогічно рух під ухил (з гори).

Під час руху транспортного засобу з гори та у гору виникає сила гравітації, яка дорівнює

$$F_g = \pm m g \sin\theta,$$

де $\pm$ – вказує на те, що транспортний засіб рухається з гори (+) та (–) – у гору.

Тоді рівняння руху (4) при русі з гори набуває вигляду:

$$V(t) = \frac{F_{\text{тяги}} + m \cdot g \cdot \sin\theta}{k} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right], \quad (5)$$

а при русі під гірку набуде наступного вигляду:

$$V(t) = \frac{F_{\text{тяги}} - m \cdot g \cdot \sin\theta}{k} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right]. \quad (6)$$

Отримані рівняння (5), (6) описують рух транспортних засобів з гори та під гору. Рух транспортних засобів з гори та під гору відрізнятиметься на певну величину від руху транспортного засобу горизонтальною площиною (рис. 1). Знаючи основні параметри транспортного засобу, їх можна використовувати до прив'язки до трактора МТЗ-80, де $m = 4000$ кг, включаючи паливо, оператора та обладнання; $k = 100$ кг/с; $F_{\text{тяги}}$ – максимальна сила тяги на гаку становить приблизно 14кН.

Транспортні технології

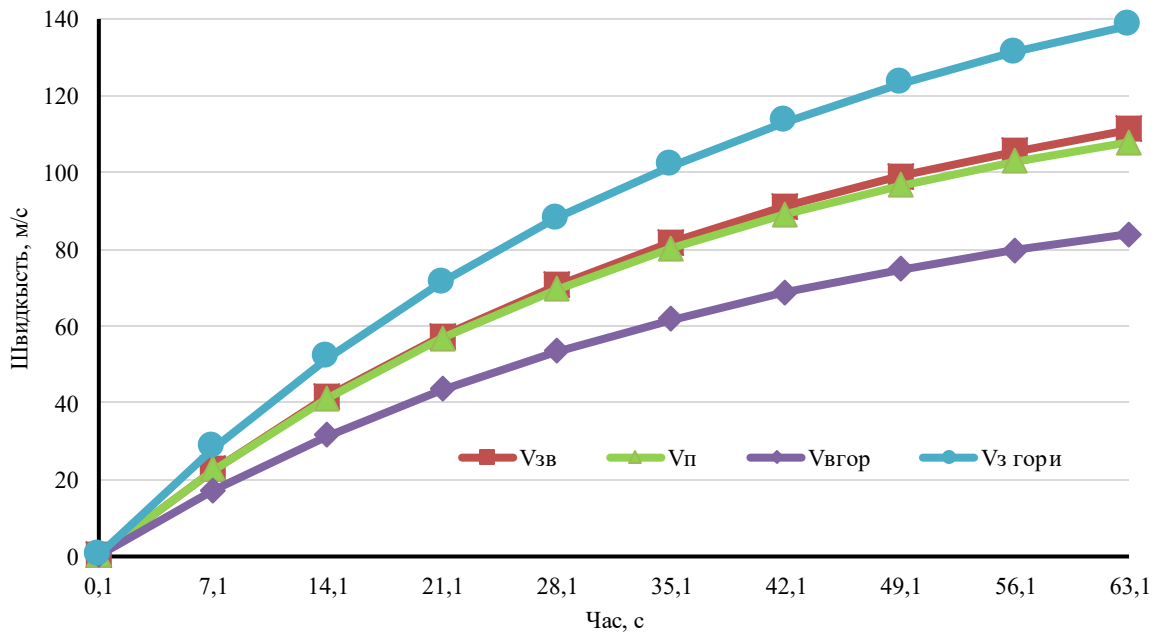


Рисунок 1 – Характер зміни швидкості під час руху транспортного засобу з гори і в гору

Як видно з рисунку 1 при однакових витратах пального під час руху транспортного засобу з гори швидкість до 1,3 рази більша ніж при русі по пухкому ґрунту та 1,7 більша ніж при русі в гору.

ВИСНОВКИ

Аналіз руху транспортного засобу з гори та в гору дозволяє глибше зрозуміти динаміку руху транспортного засобу у різних умовах, оптимізувати роботу транспортного засобу та підвищити його ефективність. Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових моделей транспортних засобів, покращення та модернізації існуючих конструкцій та навчання операторів.

Список використаних джерел

1. Артюх О. Методи вдосконалення ДВЗ на основі аналітичних розрахунків та експериментальних даних / О. Артюх, Ольга Дударенко, Дмитро Рубан, Олександр Тарасенко, Павло Цокотун // Наука і техніка сьогодні № 3(44) (2025): С. 947-975. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3\(44\)-947-975](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-947-975)
2. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників у 6 т. Т. 1 : Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин : підручник / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов ; ред.: А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. – Харків : Прапор, 2004. – 384 с.
3. Conklin J.C. A highly efficient six stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery / J.C. Conklin, J.P. Szybist // Energy, 2010. - vol. 35, no. 4, pp. 1658–1664. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.012>
4. Мінчев Д. С. Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників [Електронний ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук : спец.

05.05.03 : галузь знань 14 / Дмитро Степанович Мінчев ; Одес. нац. морськ. ун-т ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Одеса, 2023. – 385 с. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/5aa34bae-0971-48d6-9f0f-b6db1f00d5cc>

5. Анісімов В.Ф. Випробування автотракторних дизельних двигунів внутрішнього згорання / В.Ф. Анісімов, А.А. П'ясецький. – Вінниця: РВВ ВНАУ, 2010. - 41 с.

6. Тиманюк К. С. Розробка методики експрес-діагностики двигунів внутрішнього згорання на основі вейвлет-аналізу / К. С. Тиманюк, В. Л. Костенко, А. А. Николенько, А. М. Тепличук, Д. О. Адаменко // Technology Audit and Production Reserves, 2016. - 4(3(30)), 47–52. – DOI: 10.15587/2312-8372.2016.75842

7. Newman, L.G. Five stroke internal combustion engine, U.S. Pat. 6,776,144. 2004

8. Schmitz, G. Five-stroke internal combustion engine, U.S. Pat. 6,553,977. 2003

9. Makheeja, D. A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine / D. Makheeja // Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2015. - vol. 12, no. 4, pp. 7–11.

10. Osborne R. The 2/4 sight project – development of a multi-cylinder two-stroke/four-stroke switching gasoline engine / R. Osborne, J. Stokes, D. Ceccarini, N. Jackson, T. Lake, M. Joyce, S. Visser, N. Miche, S. Begg, M. Heikal, N. Kalian, H. Zhao, T. Ma // Proceedings JSAE Annual Congress, 2008. - no. 79-08, pp. 11–16.

Tsokotun P.V., Kapustian O.Ye.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VEHICLE MOTION DURING DESCENTS AND CLIMBS

The article is devoted to the current problems of improving internal combustion engines based on analytical calculations in modern conditions of increasing requirements for their efficiency, environmental friendliness and reliability. Despite the active development of electromobility and alternative energy sources, internal combustion engines continue to play a leading role in the transport industry, which necessitates their further improvement. The main attention is paid to the analysis of the reasons for the low efficiency of modern engines, including heat losses, mechanical friction and incomplete combustion of fuel, as well as to the environmental aspects of their operation. It is shown that internal combustion engines are a significant source of toxic emissions - NO_x, CO, hydrocarbons, aldehydes and particulate matter, which pose a danger to human health and the environment. Modern scientific approaches to improving the efficiency and environmental safety of internal combustion engines are analyzed, including digital diagnostics, the use of wavelet analysis, the creation of digital twins, as well as the development of multi-stroke and hybrid power plants. Comparative emission standards for diesel engines according to various Euro standards are presented, demonstrating the gradual strengthening of environmental requirements. The main attention is paid to increasing energy efficiency, reducing harmful emissions, and analyzing the movement of vehicles under various operating conditions. The main direction of the research is the analysis of engine operation when a vehicle is moving uphill and downhill. It is shown that the analysis of vehicle movement on a slope and uphill makes it possible to better understand its dynamics in different conditions, optimize operation, and increase overall efficiency. The results obtained can be useful for creating new vehicle models, improving and modernizing existing designs, and also for training operators.

Keywords: Internal combustion engine, efficiency, economy, analytical calculations, reduction of harmful emissions.

Стаття надійшла 10.12.2025р.