

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГИЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

**на тему: «Дослідження рівня викидів шкідливих речовин
автомобільними двигунами з різними технічним станом»**

Виконав: студент групи Ат-61
спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Микола ВАСЕЧКО

(ім'я та прізвище)

Керівник: Олег СУКАЧ
(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.4.048.3

Васечко Микола Миколайович. Дослідження рівня викидів шкідливих речовин автомобільними двигунами з різними технічним станом. Кваліфікаційна робота. Львів: Львівський НУВМБ ім. Степана ГЖИЦЬКОГО, 2025. 73 с.

Табл. 11; рис. 11; бібліогр. джерел 29.

У результаті дослідження встановлено, що технічний стан автомобільного двигуна є визначальним чинником рівня екологічної безпеки транспортного засобу. На основі експериментальних вимірювань та аналітичного аналізу підтверджено суттєвий вплив параметрів циліндро-поршневої групи, системи упорскування та нейтралізації відпрацьованих газів на концентрацію основних токсичних компонентів - CO, CH, NO_x та твердих частинок (PM).

Погіршення герметичності, зниження тиску упорскування чи відхилення у роботі системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) спричиняють зростання частки оксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів у вихлопі на 20–40 %, а також збільшення димності до 30 %. Для дизельного двигуна Renault K9K у модифікаціях Euro-5/6 встановлено, що сумарна ефективність систем EGR + DOC + DPF + SCR становить понад 90 %, що забезпечує концентрацію NO_x у межах 0,07–0,08 г/км і повну відповідність вимогам стандарту Euro-6.

Отримані результати засвідчують, що дотримання регламентів технічного обслуговування та своєчасна діагностика систем живлення і нейтралізації вихлопу дозволяють зменшити загальні шкідливі викиди на 25–35 % без суттєвого зниження потужності двигуна. Практичне значення роботи полягає у розробленні підходів до прогнозування рівня токсичних викидів за параметрами технічного стану двигуна. Це дає змогу оптимізувати графіки обслуговування, зменшити витрати палива на 3–5 %, а також підвищити екологічну надійність транспортного засобу.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ.....	9
1.1 Нормативне регулювання викидів шкідливих речовин автомобільними двигунами.....	9
1.2 Система нейтралізації шкідливих речовин двигуна Renault K9K 1.5 dCi.	14
1.3 Методика визначення токсичності згідно ISO 8178 та ДСТУ 4276	23
Висновки	25
РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНА НА РІВЕНЬ ВИКИДІВ	27
2.1 Загальні відомості про утворення шкідливих викидів у процесі роботи двигунів внутрішнього згоряння	27
2.2 Математичні залежності для розрахунку складу відпрацьованих газів....	35
Висновки	38
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ ДВИГУНА	39
3.1 Вибір об'єкта дослідження і характеристика моделі автомобіля	39
Висновки	44
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	45
4.1 Вимірювання концентрацій CO, CH, NO _x , CO ₂ при різних режимах роботи двигуна	45
4.2 Вимірювання концентрацій CO, CH, NO _x , CO ₂ при різних технічних станах двигуна	49
Висновки	53
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	55

5.1 Аналіз потенційних небезпечних виробничих факторів	55
5.2 Заходи по забезпеченню безпеки виробництва	56
5.3 Виробнича санітарії та гігієна на ремонтних дільницях.....	57
5.4 Заходи з пожежної безпеки та дії у надзвичайних ситуаціях.....	61
Висновки	65
РОЗДІЛ 6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	66
6.1 Економічне та екологічне обґрунтування ефективності заходів	66
Висновки	69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобільного транспорту супроводжується інтенсивним зростанням кількості транспортних засобів, що призводить до збільшення обсягів викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Одним із найважливіших джерел антропогенного забруднення атмосфери є двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), які продукують оксиди вуглецю (CO), вуглеводні (CH), оксиди азоту (NO_x), сажу та інші токсичні сполуки. Екологічна безпека транспортних систем сьогодні розглядається як ключовий чинник сталого розвитку держави, а питання контролю та зменшення токсичності автомобільних двигунів є пріоритетним напрямом науково-технічних досліджень у сфері автомобільного транспорту [4], [12].

Погіршення технічного стану двигуна, спричинене природним зносом або несвоєчасним технічним обслуговуванням, істотно впливає на процеси згоряння палива, а отже – і на рівень токсичності відпрацьованих газів. Порушення герметичності циліндро-поршневої групи, відхилення параметрів системи живлення, несправності системи запалювання або упорскування призводять до зменшення коефіцієнта повноти згоряння, збільшення питомих втрат палива та викидів шкідливих речовин. Відтак, дослідження впливу технічного стану двигуна на токсичність відпрацьованих газів має важливе практичне значення як для вдосконалення технологій діагностування, так і для розроблення ефективних заходів зі зниження негативного впливу транспорту на довкілля.

Згідно з сучасними екологічними стандартами, такими як Euro-5 і Euro-6, автомобільні виробники зобов'язані забезпечити мінімальний рівень токсичних викидів у реальних умовах експлуатації. Проте навіть новітні системи нейтралізації (каталітичні нейтралізатори, фільтри твердих частинок, селективні каталітичні відновлювачі) не гарантують відповідність нормативам у разі зниження технічного стану двигуна. Саме тому виникає необхідність дослідження взаємозв'язку між параметрами технічного стану та

концентрацією шкідливих компонентів відпрацьованих газів для розроблення дієвих діагностичних методик та оптимізації технічного обслуговування.

Актуальність теми полягає в тому, що транспортна галузь є одним із найбільших джерел забруднення повітря, а більшість експлуатованих в Україні автомобілів мають значний пробіг і, відповідно, погіршений технічний стан. Визначення закономірностей зміни рівня токсичних викидів залежно від зносу основних систем двигуна дозволить не лише оцінити екологічні ризики, а й розробити ефективні рекомендації для практики технічного обслуговування.

Мета роботи – дослідити вплив технічного стану автомобільного двигуна на рівень викидів шкідливих речовин і визначити шляхи зниження токсичності відпрацьованих газів шляхом удосконалення процесів діагностування та технічного обслуговування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз складу, властивостей і джерел утворення шкідливих компонентів відпрацьованих газів;
- дослідити вплив технічного стану основних систем двигуна на процеси згоряння палива;
- розробити методику експериментального визначення рівня викидів для двигуна з різними ступенями зносу;
- виконати порівняльний аналіз результатів вимірювань і визначити закономірності зміни концентрацій токсичних компонентів;
- розробити рекомендації щодо технічного обслуговування і регулювання двигуна з метою зниження шкідливих викидів.

Об’єкт дослідження – процес утворення і викиду шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобільних двигунів внутрішнього згоряння.

Предмет дослідження – вплив технічного стану вузлів і систем двигуна (циліндро-поршневої групи, системи живлення, запалювання, газорозподілу) на кількісний і якісний склад токсичних компонентів відпрацьованих газів.

Методи дослідження – експериментальні вимірювання концентрацій шкідливих речовин газоаналізатором на різних режимах роботи двигуна; аналітичні методи обробки даних; математичне моделювання процесів згоряння палива; порівняльний аналіз результатів з нормативними значеннями стандартів Euro.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні кількісних залежностей між показниками технічного стану двигуна та рівнем токсичних компонентів у відпрацьованих газах, а також у розробленні підходів до оперативного діагностування токсичності на основі параметрів роботи двигуна.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх застосування для підвищення екологічної ефективності автомобільних двигунів у процесі експлуатації, оптимізації регламентів технічного обслуговування та вдосконалення систем контролю токсичності на автотранспортних підприємствах.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ

1.1 Нормативне регулювання викидів шкідливих речовин автомобільними двигунами

Екологічні вимоги до автомобільних двигунів у сучасному світі регламентуються комплексом міжнародних і національних стандартів, що визначають допустимі рівні токсичних компонентів у відпрацьованих газах, а також методи їх вимірювання.

Основною метою цих нормативів є поступове зниження шкідливого впливу автомобільного транспорту на довкілля шляхом удосконалення конструкції двигунів, систем упорскування, нейтралізації та очищення вихлопу.

Перші спроби нормування токсичності відпрацьованих газів у Європі з'явилися у 1970-х роках, проте систематичне введення єдиних нормативів розпочалося лише з прийняттям серії стандартів «Еуро» (Європейська директива 70/220/ЕЕС), які надалі зазнавали численних доповнень і стали основою для всіх країн ЄС.

На даний час для легкових автомобілів діють стандарти Еуро-5 та Еуро-6, затверджені Директивою ЄС 715/2007 та відповідними Регламентами Комісії (ЄС) №692/2008, №459/2012 [4], [21].

В Україні вимоги до токсичності автомобільних двигунів гармонізовані згідно з ДСТУ 4276:2004 та Технічним регламентом колісних транспортних засобів, що базується на європейських принципах.

Основні нормативні документи. Директива ЄС 715/2007 – встановлює граничні значення викидів CO, HC, NO_x та твердих частинок (PM) для транспортних засобів категорій M₁ і N₁, а також описує процедуру перевірки на динамометричних стендах із визначенням масових викидів у грамах на кілометр (г/км).

ДСТУ 4276:2004 – «Двигуни дорожніх транспортних засобів. Методи визначення димності та токсичності відпрацьованих газів». Документ

встановлює методики випробувань дизельних і бензинових двигунів у стаціонарних і динамічних режимах. У ньому наведено формули для визначення концентрацій компонентів у відпрацьованих газах і вимоги до точності вимірювальних приладів.

ISO 8178 – «Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement». Міжнародний стандарт, який визначає цикли вимірювань, режими навантаження, вимірювальні системи, методи відбору проб, перерахунок об'ємних концентрацій у масові значення, а також допустимі похибки вимірювання.

Euro-5 та Euro-6 – екологічні норми, що встановлюють граничні масові концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах для різних типів двигунів. Вони є одними з найжорсткіших у світі.

Таблиця 1.1 – Гранично допустимі викиди для легкових автомобілів згідно з Euro-5 та Euro-6

Компонент	Одиниця виміру	Дизель Euro-5	Дизель Euro-6	Бензин Euro-5	Бензин Euro-6
CO	г/км	0,500	0,500	1,000	1,000
HC	г/км	—	—	0,100	0,100
NO _x	г/км	0,180	0,080	0,060	0,060
HC + NO _x	г/км	0,230	0,170	—	—
PM	г/км	0,005	0,005	—	0,005*
PN (част.)	част./км	6×10^{11}	6×10^{11}	—	6×10^{11}

* Зірочкою позначено застосування для бензинових двигунів з безпосереднім упорскуванням.

Як видно з таблиці 1.1, порівняно з Euro-5, стандарт Euro-6 майже вдвічі знижує допустимий рівень оксидів азоту для дизелів (з 0,18 до 0,08 г/км), зберігаючи водночас однакові норми для CO та твердих частинок. Це потребує впровадження складних систем нейтралізації наприклад таких як, SCR

(Selective Catalytic Reduction), DOC (Diesel Oxidation Catalyst), DPF (Diesel Particulate Filter), а також EGR (Exhaust Gas Recirculation).

Порівняльна характеристика бензинових і дизельних двигунів за рівнем токсичності Рівень токсичності відпрацьованих газів автомобільного двигуна визначається не лише видом палива, а й способом його згоряння, термодинамічними параметрами циклу, коефіцієнтом надлишку повітря, конструкцією систем живлення та станом технічних елементів. У загальному вигляді кількість і склад шкідливих речовин визначається теплотехнічним балансом реакцій окиснення вуглеводнів і умовами їх перебігу.

Бензинові двигуни (із примусовим займанням суміші) працюють при $\alpha = 0,9\text{--}1,1$, тоді як дизельні (з самозайманням) – при $\alpha = 1,3\text{--}2,0$. Це визначає їхню різну температуру згоряння, швидкість реакцій і характер утворення окремих шкідливих речовин.

Бензинові двигуни: мають відносно рівномірне згоряння, високу температуру полум'я ($= 2100\text{--}2300\text{ }^{\circ}\text{C}$) і схильні до утворення великої кількості CO та CH через зони локального нестачі кисню [3], [25].

Дизельні двигуни: працюють на надлишку повітря, тому згоряння ближче до повного, проте через дифузійний характер процесу і високий ступінь стиску ($\epsilon = 17\text{--}18$) утворюється більше NO_x і сажі. Хімічний склад вихлопу в нормованих умовах подано у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний склад відпрацьованих газів бензинових і дизельних двигунів

Компонент	Одиниця	Бензиновий двигун	Дизельний двигун
CO_2	% об.	13–14	12–13
O_2	% об.	0,3–1,0	3–10
CO	% об.	0,5–5,0	0,05–0,5
CH	об/хв	100–300	10–80
NO_x	об/хв	150–400	300–1000
C_s (сажа)	мг/м ³	=0	10–60
SO_2	об/хв	10–40	20–70

Як видно, дизельні двигуни виділяють значно менше CO та CH, проте більше NO_x і частинок сажі, тоді як бензинові – навпаки. Це обумовлено різною температурою згоряння, співвідношенням повітря та палива і способом займання суміші.

Для оцінки екологічності двигунів часто використовують питомі викиди – кількість шкідливої речовини, що припадає на одиницю потужності або шляху.

Таблиця 1.3 – Питомі викиди за видами двигунів

Компонент	Одиниця	Бензиновий двигун	Дизельний двигун
CO	г/кВт·год	15–35	1–5
CH	г/кВт·год	2–10	0,5–2
NO_x	г/кВт·год	4–8	6–10
PM	г/кВт·год	–	0,1–0,3

У дизельного двигуна спостерігається значно нижчий рівень CO і CH, але більш високий NO_x . Застосування систем SCR, DPF, EGR знижує ці показники до рівнів, нижчих за бензинові.

Паливна економічність і токсичність мають взаємно протилежний характер. Чим повніше використовується енергія палива, тим вища температура згоряння – і тим більше утворюється NO_x . Тому завдання конструкторів полягає у знаходженні оптимуму між ККД і токсичністю [1], [29].

Зміна технічного стану двигуна призводить до зміни параметрів процесу згоряння – тиску, температури, коефіцієнта надлишку повітря, що прямо впливає на концентрацію шкідливих речовин.

Зниження компресії та порушення герметичності камер згоряння призводять до неповного згоряння палива, зростання CO та CH. Погіршення розпилю палива форсунками збільшує локальні зони переобогачення, що підвищує кількість сажі та NO_x .

Тому стан паливної системи та ЦПГ є визначальним чинником екологічної придатності двигуна. Узагальнене порівняння екологічних характеристик

Таблиця 1.4 – Узагальнена порівняльна оцінка бензинових і дизельних двигунів

Показник	Бензиновий двигун	Дизельний двигун
ККД, %	30–33	40–45
CO, г/км	0,8–1,5	0,1–0,5
HC, г/км	0,1–0,2	0,02–0,05
NO _x , г/км	0,06	0,08–0,12
PM, г/км	=0	0,004–0,01
CO ₂ , г/км	130–150	110–130
Застосовані системи	TWC (трикомпонентний кат.)	EGR, DOC, DPF, SCR

Як видно з таблиці 1.4, дизельний двигун є більш енергоефективним і економічним, проте вимагає складнішої системи нейтралізації. Бензиновий двигун має меншу кількість NO_x, але більшу частку CO і CH.

Для подальшого зниження токсичності в обох типах двигунів активно впроваджуються:

- високотемпературні каталітичні системи з нанопокриттями (Pt, Pd, Rh);
- двофазні впускні системи та змінна геометрія турбіни, які покращують змішування;
- гомогенне самозаймання (HCCI) – режим, що поєднує низькі викиди дизеля з ефективністю бензинового циклу;
- гібридизація силових установок, що зменшує середній рівень викидів CO₂ на 20–30 %.

У підсумку можна зазначити, що дизельні двигуни, зокрема серії Renault K9K, при належному технічному стані та використанні повного комплексу систем очищення (EGR + DOC + DPF + SCR), здатні демонструвати екологічні

характеристики, порівнянні або навіть кращі за бензинові аналоги, зберігаючи

1.2 Система нейтралізації шкідливих речовин двигуна Renault K9K 1.5 dCi

Дизельний двигун Renault K9K (рис. 1.1) є одним із найпоширеніших
двигунів компанії Renault-Nissan. Його було створено на початку
2000-х років як універсальний компактний дизель для легкових і легких
комерційних автомобілів. Робочий об'єм двигуна становить 1461 кубічний
сантиметр, конструкція – чотирициліндрова, рядна, з верхнім розташуванням
розподільного вала та системою безпосереднього впорскування палива типу
Common Rail. Основна ідея розробників полягала у поєднанні високої
паливної економічності з низьким рівнем токсичних викидів, що відповідали



Рисунок 1.1 – Дизельний двигун Renault K9K

Блок циліндрів виготовлено з чавуну, що забезпечує високу міцність,
стабільність геометрії та добру теплопровідність. Циліндри мають вставні

мокрі гільзи, які полегшують ремонт і сприяють рівномірному охолодженню. Головка блока виконана з алюмінієвого сплаву, що зменшує масу двигуна й покращує тепловідведення. Вона оснащена або одним, або двома розподільними валами залежно від модифікації. Газорозподільний механізм приводиться зубчастим ременем, який одночасно обертає насос охолоджувальної рідини та паливний насос високого тиску. У більшості версій використано гідрокомпенсатори теплових зазорів клапанів, тому періодичне регулювання не потрібне.

Колінчастий вал виготовлений із кованої сталі та має п'ять опор, що забезпечують достатню жорсткість і довговічність. Поршні алюмінієві, з тороїдальною камерами згоряння у днищі. Така форма дозволяє покращити завихрення повітря і сприяє більш повному згорянню палива. Шатуни сталеві, ковані, з плаваючими поршневыми пальцями. Система змащення комбінована: масло подається під тиском через канали до опор колінчастого вала та розбризкується на поверхню циліндрів для охолодження поршнів.

Особливу роль у забезпеченні високої ефективності двигуна відіграє паливна система Common Rail. Вона складається з насоса високого тиску, акумулятора (рейки) та електромагнітних форсунок, які відкриваються і закриваються під керуванням електронного блоку управління.



Рисунок 1.2 – Паливна система Common Rail двигуна Renault K9K

Така система забезпечує дуже точне дозування палива, можливість багатофазного впорскування протягом одного циклу та тиск до двох тисяч бар. Це дозволяє досягти тонкого розпилу палива, рівномірного займання та суттєвого зниження шумності й токсичності вихлопу.

Двигун оснащується турбонаддувом, який підвищує ефективність наповнення циліндрів повітрям. У версіях Euro-5 застосовується турбіна з фіксованою геометрією, а у версіях Euro-6 – турбіна зі змінною геометрією, що дає змогу оптимізувати тиск наддуву на всьому діапазоні обертів. Стиснене повітря охолоджується у проміжному теплообміннику (інтеркулери), що підвищує густину заряду і сприяє більш повному згорянню палива. Завдяки наддуву двигун демонструє високий крутний момент уже з низьких обертів, що особливо важливо для міського та змішаного режиму руху.

Система охолодження рідинна, замкненого типу, з термостатом, який відкривається приблизно при 90°C. Вона включає насос, радіатор, охолоджувач відпрацьованих газів системи рециркуляції, а також додаткові контури для охолодження мастила і турбіни. Робоча температура двигуна підтримується у межах від вісімдесяти до дев'яности п'яти градусів, що є оптимальним для забезпечення високої ефективності та зниження утворення шкідливих сполук.

Система змащення двигуна комбінована, з масляним насосом шестеренного типу, який приводиться від колінчастого вала. Змащення здійснюється під тиском до пів мегапаскалів, а також шляхом розбризкування. Масляний фільтр має перепускний клапан для стабілізації тиску, а контроль параметрів змащення здійснюється датчиком, сигнал з якого подається на блок управління.

Важливою складовою конструкції є комплекс систем очищення відпрацьованих газів. Для зменшення утворення оксидів азоту застосовується охолоджувана рециркуляція відпрацьованих газів. Відразу за турбіною розташований окиснювальний каталізатор, що перетворює оксид вуглецю та вуглеводні у вуглекислий газ і воду. Далі потік проходить через фільтр твердих

частинок, у якому осідає сажа, і завершує очищення у каталітичному нейтралізаторі типу SCR, де оксиди азоту перетворюються на азот і воду внаслідок реакції з аміаком, що утворюється з реагенту AdBlue. Усі ці системи працюють під керуванням електронного блоку, який постійно аналізує сигнали з датчиків і коригує параметри упорскування, рециркуляції та подачі реагенту.

Електронна система керування є повністю інтегрованою. Блок ECU отримує інформацію від датчиків тиску, температури, положення колінчастого і розподільного валів, датчиків кисню, масової витрати повітря, температури вихлопних газів, диференційного тиску на фільтрі твердих частинок і сенсорів NO_x. На основі цих даних обчислюється оптимальна кількість палива для впорскування, момент початку упорскування, тривалість імпульсу, положення дросельної заслінки (для систем з EGR), а також керування турбіною. Така система дозволяє не лише забезпечити високу ефективність двигуна, а й підтримувати стабільно низький рівень викидів шкідливих речовин незалежно від зовнішніх умов.

Двигун K9K характеризується високою економічністю: середня витрата палива становить від чотирьох до п'яти літрів дизельного палива на сто кілометрів пробігу, що відповідає питомій витраті близько двохсот десяти грамів на кіловат-годину. При цьому рівень викидів оксидів азоту та частинок сажі у версіях, що відповідають стандарту Euro-6, знижено більш ніж удвічі порівняно з попередніми модифікаціями.

Система EGR (Exhaust Gas Recirculation) призначена для зменшення утворення оксидів азоту (NO_x) шляхом повернення частини відпрацьованих газів у впускний тракт. Принцип дії базується на зменшенні температури згоряння за рахунок розведення робочої суміші інертними компонентами.

У двигунах Renault K9K застосовується охолоджувана високотемпературна EGR-система із електропневматичним клапаном (рис. 1.3) і теплообмінником. Потік газів регулюється електронно, залежно від навантаження та температури двигуна.



Рисунок 1.3 – EGR-система із електропневматичним клапаном і теплообмінником двигуна Renault K9K

К

- о • відвідний канал від випускного колектора;
- н • теплообмінник (EGR cooler) з рідинним охолодженням;
- с • клапан керування з електронним актуатором;
- т • датчики тиску та температури до і після EGR;
- р • зворотний трубопровід до впускного колектора.

у Система враховує кількість рециркульованих газів та визначається коефіцієнтом β :

$$\beta = (G_{egr} / G_a) \times 100 \%, \quad (1.1)$$

і де G_{egr} – масова витрата газів, що повертаються у впуск, кг/с;

я

с

G_a – загальна витрата повітря, кг/с.

Типові значення β для двигунів K9K – 5...25 %, залежно від режиму. Зі збільшенням β знижується пікова температура полум'я (на 100–150 °C), що дає змогу зменшити утворення NO_x на 40–60 %.

У системі передбачений байпас – у разі низьких температур або підвищеного навантаження EGR частково або повністю відключається, щоб уникнути падіння ефективності двигуна та надлишкового накопичення сажі.

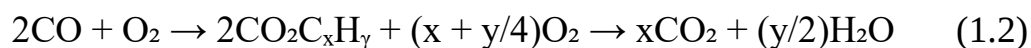
Окиснювальний каталізатор DOC (Diesel Oxidation Catalyst) є першою стадією очистки у випускній системі дизеля. Його основне завдання – окиснення CO, HC і частково сажі.



Рисунок 1.4 – Окиснювальний каталізатор DOC двигуна Renault K9K

Конструктивно це металічний або керамічний блок із сотоподібною структурою, покритий каталізатором на основі платини (Pt) та паладію (Pd), нанесених на активний шар $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Основні реакції, що протікають у DOC:



У результаті проходження через каталізатор зменшення концентрації CO та CH становить 80–95 %.

Крім того, DOC генерує додаткове тепло (екзотермічні реакції), необхідне для регенерації DPF.

Схема конструкції DOC: корпус із нержавіючої сталі, розрахований на тиск 0,3–0,5 МПа, монолітний блок-носій з комірчастою структурою (400–600 комірок/дюйм²); каталітичне покриття; теплозахисна оболонка.

У двигунах Renault K9K DOC розміщено безпосередньо після турбокомпресора, щоб забезпечити достатню температуру для активації каталізатора (не нижче 250 °C).

Система фільтрації твердих частинок DPF (Diesel Particulate Filter). Фільтр твердих частинок призначений для механічного уловлювання сажі (частинок вуглецю та незгорілого палива) у потоці вихлопних газів. Ефективність DPF сягає 95–99 % при правильній регенерації.

Типова конструкція DPF: корпус із жаростійкої сталі; пористий керамічний фільтруючий елемент із матеріалу карбиду кремнію (SiC) або кордієриту; канали із чергуванням закритих торців, що забезпечують проходження газів через пористі стінки; датчики тиску (Δp) і температури, що контролюють рівень заповнення сажі.

Кількість накопиченої сажі m_s визначається за співвідношенням:

$$m_s = k_p \cdot \Delta p, \quad (1.3)$$

де Δp – перепад тиску на фільтрі, Па;

k_p – коефіцієнт пропорційності (визначається експериментально для конкретного типу DPF).

Регенерація DPF може бути:

- пасивною – окиснення сажі завдяки діям NO_2 при $T > 350$ °C;
- активною – короткочасне підвищення температури (до 600 °C)

шляхом впорскування додаткового палива перед DOC або через електричні нагрівачі.

Реакції регенерації:



У двигунах Renault K9K використовується пасивно-активна система, де ECU ініціює додаткове упорскування палива для підтримки необхідної температури фільтра. Це дає змогу уникнути засмічення DPF навіть при коротких міських поїздках.

Система селективного каталітичного відновлення SCR (Selective Catalytic Reduction) використовується для зниження концентрації NO_x до безпечних сполук – азоту (N_2) і води (H_2O) – за допомогою реакції відновлення аміаком, що утворюється з водного розчину сечовини (AdBlue, 32,5 % NH_2CONH_2).

Основні реакції в SCR-каталізаторі:

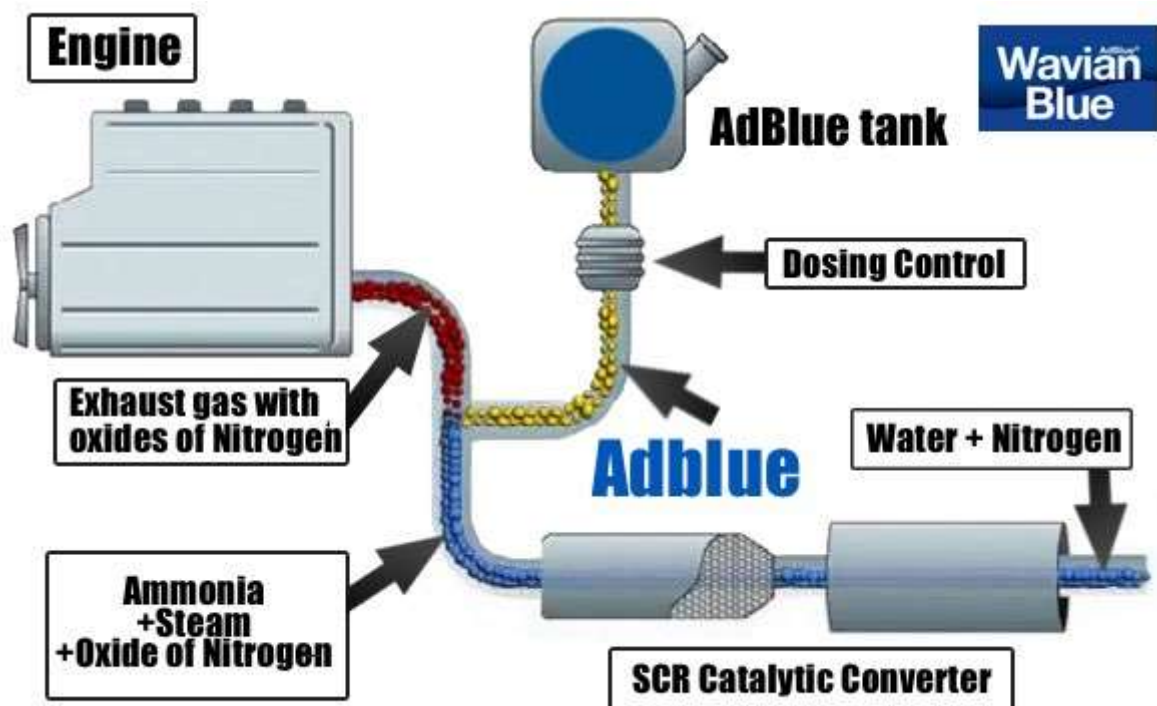
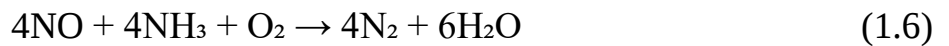


Рисунок 1.5 – Система SCR

Кількість упорскуваного реагенту визначається блоком керування залежно від концентрації NO_x , температури вихлопу та масової витрати газів:

$$m_d = k_a \cdot (\text{NO}_x)_{\text{ent}} \cdot m_{\text{exh}}, \quad (1.8)$$

де m_{ad} – масова витрата AdBlue, кг/с;

$(NO_x)_{ent}$ – концентрація NO_x на вході в SCR, об/хв;

m_{exh} – масова витрата відпрацьованих газів;

k_a – коефіцієнт стехіометричної компенсації.

Ефективність системи SCR визначається коефіцієнтом очищення:

$$\eta_{nox} = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100 \%, \quad (1.9)$$

де C_0 і C_1 – концентрації NO_x до і після каталітичного блоку.

Для двигуна K9K 846 (Euro-6) у реальних умовах руху $\eta_{nox} = 85\text{--}90 \%$.

Інтеграція систем у єдину архітектуру очищення у дизельних двигунах Renault K9K післятретмент розташований у такій послідовності: турбокомпресор → DOC → DPF → SCR → глушник

Усі системи контролюються електронним блоком керування ECU (Continental SID 305/310), який аналізує сигнали з понад десяти датчиків: температури, тиску, масової витрати повітря, диференціального тиску на DPF, NO_x -сенсорів тощо. На основі цих даних ECU регулює подачу палива, кут упорскування, роботу EGR-клапана, температуру каталізатора та дозування AdBlue.

Таблиця 1.4 – Орієнтовні параметри систем очищення у двигуні Renault K9K (Euro-6)

Система	Ефективність очищення, %	Діапазон робочих температур, °C	Основні реакції / функції
EGR	40–60 (NO_x)	80–400	Зниження температури згоряння, зменшення NO_x
DOC	80–95 (CO, HC)	250–500	Окиснення CO, HC, генерація NO_2
DPF	95–99 (PM)	300–650	Механічне фільтрування, регенерація сажі
SCR	85–90 (NO_x)	200–450	Відновлення NO_x до N_2 і H_2O

Сумарне зниження шкідливих викидів у двигунах Renault K9K (Euro-6) порівняно з базовими версіями Euro-3 становить:

- NO_x – на 85–90 %;
- CO – на = 80 %;
- CH – на = 85 %;
- PM – практично повне (до 99 %).

Загальний коефіцієнт екологічної ефективності можна описати відношенням:

$$\eta_{eko} = (\Sigma m_{0x} - \Sigma m_{1x}) / \Sigma m_{0x} \times 100 \%, \quad (1.10)$$

де Σm_{0x} – сумарна маса токсичних компонентів до систем очищення, г/км;

Σm_{1x} – після очищення.

Для Renault K9K 846 (Euro-6) $\eta_{eko} = 90\text{--}92 \%$.

Таким чином, комбінована дія EGR, DOC, DPF і SCR дозволяє дизельним двигунам K9K забезпечувати стабільну відповідність вимогам Euro-6 навіть у режимах міського руху. Кожна система має власну оптимальну робочу температуру й інтегрується в узгоджений цикл, керований ЕБК.

1.3 Методика визначення токсичності згідно ISO 8178 та ДСТУ 4276

Процедура вимірювання викидів передбачає застосування динамометричних випробувань на стенді, де двигун працює у декількох режимах навантаження. Для кожного режиму фіксують витрати палива, повітря, температуру вихлопу, частоту обертання, а також концентрації CO, C

О Середнє зважене значення концентрації визначається формулою:

$$C_{sp} = (\Sigma C_i \cdot t_i) / (\Sigma t_i), \quad (1.11)$$

, де C_i – миттєва концентрація компонента у i -тому режимі;

t_i – тривалість роботи у даному режимі.

C

H

,

Для перерахунку об'ємної частки у масову концентрацію (г/кг палива) застосовується вираз:

$$m_x = (C_x \cdot M_x \cdot \rho_g) / (100 \cdot V_m), \quad (1.12)$$

де C_x – об'ємна концентрація, %;

M_x – молекулярна маса компонента, г/моль;

ρ_g – густина відпрацьованих газів, кг/м³;

V_m – молярний об'єм, м³/моль ($22,4 \cdot 10^{-3}$ при 0 °С, 1 атм).

Для зручності у практиці використовують коефіцієнти перерахунку, визначені у ДСТУ 4276, які дозволяють отримувати результати у г/км чи г/кВт·год залежно від типу випробування.

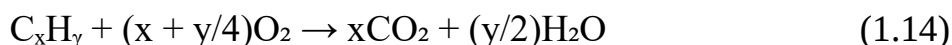
Двигун Renault K9K у модифікаціях 772, 796, 804, 836, 836D відповідає стандартам Euro-5, а версії 846, 872, 874 – Euro-6. Порівняльні характеристики токсичності цих варіантів наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняння показників токсичності двигунів Renault K9K різних стандартів

Модифікація	Потужність, к.с.	CO, г/км	NO _x , г/км	PM, г/км	Стандарт
K9K 772	86	0,45	0,17	0,005	Euro-5
K9K 804	90	0,41	0,15	0,004	Euro-5
K9K 846	110	0,39	0,08	0,004	Euro-6
K9K 872	115	0,38	0,07	0,003	Euro-6

Зниження NO_x у новіших модифікаціях досягається за рахунок удосконалення системи EGR із охолодженням відпрацьованих газів та застосування SCR-каталізаторів, що використовують реагент AdBlue (водний розчин сечовини).

Окиснення CO і CH здійснюється у DOC-каталізаторі, де в присутності платинових або паладієвих каталізаторів реакції відбуваються за схемою:



Система DPF затримує частинки сажі, які потім окиснюються під час регенерації фільтра при підвищеній температурі ($=600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для двигунів K9K у реальних умовах $\eta_{\text{пох}} = 80\text{--}90\text{ \%}$, що дозволяє впевнено досягати норм Euro-6

Сучасні дизельні двигуни внутрішнього згоряння характеризуються високим термічним ККД (до 45 %), але водночас вони є основним джерелом викидів оксидів азоту (NO_x) і твердих частинок (PM). Для зменшення шкідливого впливу відпрацьованих газів використовується комплекс конструктивних і технологічних рішень, що об'єднують системи внутрішнього (вплив на процес згоряння) та зовнішнього очищення (післятретмент).

У двигунах Renault K9K Euro-5/6 реалізовано комбінацію технологій EGR + DOC + DPF + SCR, які взаємодіють між собою через систему керування ECU.

Висновки

1. Проведено аналіз процесів утворення шкідливих викидів у дизельних двигунах та чинників, що впливають на їх кількість. Встановлено, що основними компонентами відпрацьованих газів є оксиди вуглецю, вуглеводні, оксиди азоту, сажа та сірчисті сполуки, рівень яких визначається якістю згоряння палива і технічним станом двигуна.

2. Розглянуто дію міжнародних екологічних стандартів Euro-5 і Euro-6, а також положення ДСТУ 4276 та ISO 8178. Визначено, що перехід до стандарту Euro-6 потребував впровадження сучасних систем нейтралізації вихлопу, таких як EGR, DOC, DPF і SCR.

3. Описано конструкцію двигуна Renault K9K 1.5 dCi, який завдяки системі впорскування Common Rail, турбонаддуву зі змінною геометрією та комплексній системі очищення вихлопу забезпечує високу економічність і відповідність вимогам Euro-6.

4. Порівняльний аналіз бензинових і дизельних двигунів показав, що дизелі мають вищий коефіцієнт корисної дії та менші викиди CO і CH, проте потребують складніших систем очищення через утворення NO_x і частинок сажі.

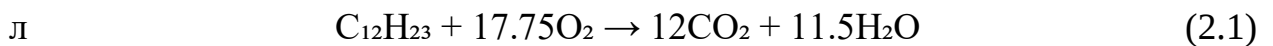
5. Встановлено, що рівень токсичності двигуна визначається його технічним станом, точністю дозування палива та ефективністю систем післяобробки.

РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВИГУНА НА РІВЕНЬ ВИКИДІВ

2.1 Загальні відомості про утворення шкідливих викидів у процесі роботи двигунів внутрішнього згоряння

Відпрацьовані гази двигунів внутрішнього згоряння є складною багатокомпонентною сумішшю, що містить як нешкідливі продукти повного згоряння палива (вуглекислий газ CO_2 , водяну пару H_2O , азот N_2 , кисень O_2), так і токсичні сполуки – оксиди вуглецю (CO), незгорілі вуглеводні (CH), оксиди азоту (NO_x), альдегіди, сажу, сірчисті з'єднання. Кількісний і якісний склад цих компонентів залежить від конструкції двигуна, складу паливно-повітряної суміші, температури згоряння, ступеня стиску, кута випередження упорскування, а також від технічного стану системи ж

и Хімічна реакція повного згоряння дизельного палива (умовно прийнятого як $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$) записується у вигляді:



е У реальних умовах процес згоряння є неповним, тому частина вуглецю і водню утворює CO , CH та сажу (C_s), а за високих температур – оксиди азоту (NO , NO_2).

я Залежно від коефіцієнта надлишку повітря α , співвідношення компонентів змінюється. Коефіцієнт надлишку повітря визначається як:

$$\alpha = L_a / L_t, \quad (2.2)$$

г де L_a – фактична кількість повітря, що подається у циліндр, кг повітря на 1 кг палива;

з L_t – теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння 1 кг палива.

р Для дизельних двигунів Renault K9K типовими є значення $\alpha = 1.3 \dots 2.0$, що забезпечує роботу з надлишком повітря і сприяє більш повному згорянню, проте створює умови для утворення NO_x при високих температурах згоряння ($1800\text{--}2200^\circ\text{C}$).

о

д

Вміст оксидів вуглецю CO у відпрацьованих газах дизельних двигунів зазвичай не перевищує 0,1–0,5 %, проте при зниженні стиску або несправності форсунок може збільшуватися до 1,5–2 %. Концентрація незгорілих вуглеводнів CH у нових двигунах становить 10–60 об/хв, але при зносі форсунок або порушенні ущільнення ЦПГ може зростати в кілька разів.

Основні токсичні компоненти відпрацьованих газів дизельного двигуна – оксиди вуглецю (CO), вуглеводні (CH), оксиди азоту (NO_x), сажа (C_s), а також частково сірчисті сполуки (SO₂).

Оксид вуглецю (CO). Виникає внаслідок неповного окиснення вуглецю:
 $2C + O_2 \rightarrow 2CO$, $CO \rightarrow CO_2$ (повне окиснення).

За нестачі кисню або нерівномірного розпилення палива реакція не доходить до завершення, тому частина CO залишається у складі газів.

Незгорілі вуглеводні (CH). Ці сполуки утворюються у зонах локального надлишку палива, де температура нижча від 700–800 °C. Значну частину вуглеводнів утворює тонкий шар палива, що осідає на стінках циліндра та не встигає згоріти під час робочого циклу.

Оксиди азоту (NO_x). Механізм їхнього утворення описується так званим механізмом Зельдовича.

Основна реакція має вигляд:



Швидкість утворення NO пропорційна температурі камери згоряння за експоненціальним законом:

$$w_{no} = \exp(-E_a / RT), \quad (2.4)$$

де E_a – енергія активації реакції ($= 3,2 \times 10^5$ Дж/моль);

R – універсальна газова стала;

T – температура газів.

Найінтенсивніше утворення NO_x спостерігається при 1800–2100 °C та $\alpha = 1,2–1,6$.

Сажа утворюється у зонах локального надлишку палива та недостатнього окиснення ($\alpha < 0,8$).

Умовно масову частку сажі можна оцінити за співвідношенням:

$$m_s = k_s \cdot (1 - \alpha/\alpha_0), \quad (2.4)$$

де k_s – емпіричний коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна;

α_0 – граничне значення коефіцієнта повітря, за якого утворення сажі припиняється (для дизеля = 1,4).

На рівень токсичних викидів дизельного двигуна впливають такі основні фактори:

- конструктивні параметри камери згоряння (ступінь стиску ϵ , форма поршня, напрям упорскування палива);
- параметри упорскування (кут випередження ϕ_e , тиск упорскування p_i , розпилювання форсунок);
- температурно-тепловий стан двигуна;
- склад палива та кількість сірки у ньому;
- технічний стан вузлів і систем.

Для двигуна Renault K9K (об'єм 1.5 л, ступінь стиску $\epsilon = 17.6$, система Common Rail із тиском до 1600 бар, турбонаддув із інтеркулером) характерне відносно чисте згоряння завдяки точному електронному дозуванню палива та високому тиску упорскування.

Проте при зносі форсунок або зниженні тиску впорскування порушується дисперсність розпилу, що призводить до утворення зони переобогаченої суміші, де інтенсивно формується СО і сажа.

Тепловий стан двигуна суттєво впливає на реакції утворення NO_x . Емпірично залежність вмісту NO_x від температури згоряння можна виразити:

$$\text{NO}_x = k_n \cdot \exp(0,0025 \cdot T_r), \quad (2.5)$$

де NO_x – концентрація оксидів азоту, об/хв;

k_n – коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості двигуна;

T_r – середня температура згоряння, °С.

Баланс NO_x –РМ. Коли ефективний α зменшується (через EGR, падіння тиску наддуву, забруднення фільтра повітря), локально зростає ϕ і збільшується РМ та СО/СН; одночасно температура може як зростати (піки у

факелі), так і спадати (загальний O_2 нижчий). На практиці ECU + SCR тримають NO_x у межах, але DPF частіше потребує регенерації.

Вік двигуна/знос. Зниження компресії і погіршення розпилу підвищують ефективний ϕ у частині об'єму камери: ростуть CO і PM, а NO_x тримається або зростає в піках. На стенді це проявляється в збільшенні димності при PN і в підвищеній витраті палива.

На холостому ході α великий, але температура низька: NO_x мінімальний; при середніх навантаженнях – «золота середина» для економічності, але найвища схильність до NO_x ; при номінальному навантаженні – ризик збільшеного утворення PM/CO через локальне збагачення, ECU обмежує подачу для димності.

Робота системи нейтралізації. Каталізатор DOC зменшує CO/CH; DPF «збирає» PM, але вимагає термального ресурсу; SCR компенсує NO_x за умови правильної T і дозування. Всі три ланки чутливі до зсувів α .

Приклад розрахунково-порівняльної оцінки для трьох режимів

Для узгодженості подамо нормовані (відносні) результати, де «1,00» – типове значення справного K9K на SN із належним EGR/SCR/DPF.

Таблиця 2.1 – Відносні показники (справний двигун)

Показник	Холостий режим ($\alpha=2,3$)	Середнє навантаження ($\alpha=1,0-1,1$ ефект.)	Номінальне навантаження ($\alpha=0,8-0,9$)
NO_x (відн.)	0,4–0,5	1,00	1,2–1,4 (до SCR)
CO (відн.)	0,5	1,00	1,8–2,2
CH (відн.)	0,8–1,0	1,00	1,5–1,8
PM (відн.)	0,6–0,8	1,00	2,0–3,0 (до DPF)
Витрата палива (відн.)	0,2–0,3	1,00	1,8–2,1

Перехід від середнього до номінального навантаження зміщує α униз, піднімає локальне ϕ , що збільшує CO/CH/PM, а NO_x – помірно зростає до

каталітичної корекції SCR. На холостому режимі – низькі NO_x , але потенційні - CH .

Вихідні умови для розрахунків (типові для K9K на середньому навантаженні, стендові умови): тиск упорскування $p_i = 1600$ бар (справний), 1200–1400 бар (знос); діаметр сопла $d_n = 0,16$ мм; температура повітря наприкінці стиску $T_c = 800\text{--}900$ К; тиск у циліндрі під час упорскування $p_c = 50$ бар; густина повітря в камері $\rho_a = p_c / (R \cdot T_c) = 5 \cdot 10^6 / (287 \cdot 800) = 21,8$ кг/м³; густина палива $\rho_l = 830$ кг/м³; в'язкість $\mu_l = 2,5$ мПа·с; поверхневий натяг $\sigma = 0,025$ Н/м. Для порівнянь використовуємо відомі емпіричні залежності з правильною якісною чутливістю; абсолютні значення приймаємо в межах, характерних для дизельних форсунок Common Rail.

Оцінка дисперсності розпику (SMD, d_{32}). Для плунжерних Common Rail у першому наближенні приймемо залежність виду $d_{32} \propto d_n \cdot (\Delta p)^{(-0,25)} \cdot \rho_a^{(-0,25)}$. Це коректно відтворює ключові залежності: зростання тиску впорскування і густини газу дробить струмінь на дрібніші краплі.

Вихідна умова залежність: при $p_i = 1600$ бар для K9K $d_{32} = 18$ мкм (типове значення).

$$\text{Тоді для } 1200 \text{ бар } d_{32}(1200) / d_{32}(1600) = (1600 / 1200)^{(0,25)} = 1,074.$$

$$\text{отже, } d_{32}(1200) = 18 \cdot 1,074 = 19,3 \text{ мкм.}$$

Додатково врахуємо вплив EGR/зниження ρ_a на 10 % (забруднений інтеркулер, «пере-EGR»): множник $\rho_a^{(-0,25)} \rightarrow (1/0,9)^{(0,25)} = 1,027$. Тоді $d_{32} = 19,9\text{--}20,0$ мкм.

Процес формування паливо-повітряної суміші у дизельному двигуні Renault K9K значною мірою залежить від якості розпилювання палива, тобто від тиску впорскування, густини повітря ρ_a , температури в камері згоряння та технічного стану форсунок. Від цих факторів залежить розмір крапель, швидкість їх випаровування і ступінь рівномірності суміші. Середній діаметр крапель палива визначається співвідношенням

$$d_{32} = k \times d_n \times (\Delta p)^{-0,25} \times \rho_a^{-0,25}, \quad (2.6)$$

де d_{32} – середній діаметр крапель (у мкм);

k – безрозмірний коефіцієнт, що враховує форму отворів форсунки;

d_n – діаметр сопла;

Δp – перепад тиску між системою упорскування і середовищем у камері згоряння;

ρ_a – густина повітря.

Це рівняння відображає фізичний зв'язок між тиском упорскування та розміром крапель: підвищення Δp або густини ρ_a призводить до інтенсивнішого розпилювання, тоді як зниження цих параметрів збільшує діаметр крапель. Для двигуна К9К при тиску 1600 бар середній діаметр становить приблизно 18 мкм. Коли тиск падає до 1200 бар, а густина ρ_a зменшується на 10 %, діаметр збільшується до близько 20 мкм (+10–12 %). Це безпосередньо впливає на швидкість випаровування та гомогенність суміші.

Час випаровування крапель визначається за законом:

$$t_{ev} = D_0^2 / K_v, \quad (2.7)$$

де t_{ev} – тривалість випаровування краплі;

D_0 – початковий діаметр краплі;

K_v – ефективний коефіцієнт випаровування, що залежить від температури T , тиску p і властивостей палива.

Для дизельного палива при температурі 800–900 К і $K_v = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ маємо:

$$\text{при } D_0 = 18 \text{ мкм} \rightarrow t_{ev} = 0,324 \text{ мс};$$

$$\text{при } D_0 = 20 \text{ мкм} \rightarrow t_{ev} = 0,400 \text{ мс}.$$

Отже, збільшення D_0 лише на 11 % подовжує час випаровування майже на 23 %, що зменшує швидкість утворення гомогенної суміші і створює зони збагачення, у яких підвищується температура й утворюється сажа.

Затримка займання дизельного палива описується виразом

$$\tau_{id} = A \times p^{-m} \times \exp(E / (R \times T_c)), \quad (2.8)$$

де τ_{id} – час затримки займання;

A – емпіричний коефіцієнт;

p – тиск у камері згоряння;

m – показник ступеня (0,7–1,0);

E – енергія активації;

R – газова стала;

T_c – температура наприкінці стиску.

Для двигуна Renault K9K за $T_c = 880\text{--}900\text{ K}$ τ_{id} дорівнює 0,7–0,8 мс. При зниженні T_c до 840–860 K час збільшується до 0,9–1,0 мс, а при 800–820 K – до 1,1–1,3 мс. Подовження затримки займання означає накопичення більшої кількості палива до моменту самозаймання, що підвищує пікові тиски, температуру та утворення NO_x .

Довжина проникнення паливного струменя у камері згоряння визначається залежністю

$$S(t) = K_s \times (\Delta p / \rho_a)^{1/2} \times t, \quad (2.9)$$

де $S(t)$ – довжина проникнення у момент часу t ;

K_s – коефіцієнт, що враховує геометрію форсунки;

t – час від початку упорскування.

Якщо тиск упорскування зменшується з 1600 до 1200 бар, а густина ρ_a падає на 10 %, значення $(\Delta p / \rho_a)^{1/2}$ зменшується на 10–12 %. Це скорочує довжину проникнення струменя та погіршує рівномірність змішування палива з повітрям. Частина палива потрапляє на холодні стінки поршневої виїмки, що сприяє появі відкладень і збільшенню кількості незгорілих вуглеводнів.

Отримані розрахунки свідчать, що навіть невелике зниження тиску упорскування чи густини повітря ρ_a суттєво впливає на швидкість сумішоутворення, теплову структуру згоряння та рівень токсичних викидів. Для забезпечення стабільності процесу необхідно підтримувати номінальний тиск у системі Common Rail, контролювати компресію та температуру стиску, а також забезпечувати правильну роботу турбонагнітача і системи EGR.

Таблиця 2.2 – Порівняльні параметри процесу сумішоутворення та токсичності відпрацьованих газів двигуна Renault K9K

Параметр	Справний стан	Помірний знос	Значний знос
Тиск упорскування p_i , бар	1600	1400	1200
Густина повітря ρ_a , кг/м ³ (вплив EGR та інтеркулера)	21,8	20,5	19,6
Середній діаметр крапель d_{32} , мкм	18,0	19,0	20,0
Час випаровування t_{ev} , мс	0,324	0,360	0,400
Затримка займання $\tau_i d$, мс (з урахуванням T_c і компресії)	0,7–0,8	0,9–1,0	1,1–1,3
Ефективний коефіцієнт надлишку повітря α_{ef}	1,10	1,00	0,90
Відносна зміна викидів NO_x (до SCR)	1,00	1,05–1,10	1,15–1,30
Відносна зміна викидів CO	1,00	1,4–1,6	1,8–2,2
Відносна зміна викидів CH	1,00	1,3–1,5	1,6–1,9
Відносна зміна викидів твердих частинок PM (до DPF)	1,00	1,6–2,0	2,5–3,5
Частота регенерацій фільтра DPF	номінальна	підвищена	часта

Перехід від справного стану двигуна до зношеного характеризується зменшенням тиску упорскування приблизно на 12–13 % та густини повітря ρ_a на 6 %. Це призводить до збільшення середнього діаметра крапель d_{32} приблизно на 5–6 %, часу випаровування t_{ev} – на 10–12 % і затримки займання $\tau_i d$ – до 1,0 мс. Як наслідок, зростають концентрації CO та CH у 1,4–1,6 раза, а твердих частинок PM – до двох разів.

При переході до критичного стану тиск упорскування знижується ще на 200 бар, густина ρ_a – на 5 %, а температура стиску T_c падає на 30–40 К. Це погіршує дисперсність розпилювання, збільшує d_{32} до 20 мкм і подовжує t_{ev} до 0,4 мс. Час займання $\tau_i d$ сягає 1,3 мс, що викликає накопичення незгорілого палива, пізнє згоряння та різке підвищення викидів PM (у 2,5–3,5 раза) і CO.

Викиди NO_x , навпаки, зростають помірно (до 30 %) завдяки частковому зниженню температури згоряння при збідненні суміші. Проте це збільшення компенсується системою SCR, тоді як DPF у таких умовах працює у режимі частих регенерацій, що знижує його ресурс.

У сукупності ці тенденції підтверджують: навіть невеликі відхилення у тиску упорскування, компресії або щільності повітря суттєво впливають на процес сумішоутворення і визначають не лише економічність, а й екологічну стабільність дизельного двигуна.

2.2 Математичні залежності для розрахунку складу відпрацьованих газів

Оцінювання складу відпрацьованих газів дозволяє кількісно визначити екологічні показники роботи двигуна, виявити вплив технічного стану на процес згоряння та встановити ефективність систем післяобробки. Для дизельного двигуна Renault K9K 1.5 dCi ці розрахунки базуються на теплотехнічних співвідношеннях між кількістю палива, повітря, температурою процесу та результатами хімічного окиснення.

Коефіцієнт надлишку повітря:

$$\alpha = L_a / L_t, \quad (2.10)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря;

L_a – фактична кількість повітря, що надходить у циліндр;

L_t – теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння 1 кг палива.

Для дизельного палива ($C_{12}H_{23}$) $L_t = 14,5$ кг повітря на 1 кг палива. При $\alpha < 1,2$ суміш вважається збагаченою, процес згоряння неповний, зростають викиди CO і частинок РМ. При $\alpha > 2$ температура падає, реакції уповільнюються, підвищується частка СН. Оптимальні значення α для двигуна Renault K9K становлять 1,4–1,8 залежно від навантаження.

Основним фактором, що визначає утворення токсичних компонентів, є температура у зоні факела. Залежність швидкості утворення оксидів азоту від температури описується експоненційною залежністю:

$$NO_x = A_n \times \exp(B_n \times T_{ad}), \quad (2.11)$$

де NO_x – концентрація оксидів азоту;

A_n, B_n – експериментальні коефіцієнти;

T_{ad} – адіабатична температура полум'я.

При підвищенні T_{ad} з 1900 до 2100 К кількість NO_x може зрости удвічі. Навпаки, зниження температури на 100–150 К завдяки системі рециркуляції (EGR) або збільшенню α зменшує утворення NO_x на 30–40 %.

$$\tau_{id} = A \times p^{-m} \times \exp(E / (R \times T_c)), \quad (2.12)$$

де τ_{id} – час затримки займання;

A – емпіричний коефіцієнт, що враховує хімічну активність палива;

p – тиск у камері згоряння під час упорскування;

m – показник ступеня (0,7–1,0);

E – енергія активації реакцій;

R – універсальна газова стала;

T_c – температура повітря наприкінці стиску.

Зменшення температури T_c або тиску p подовжує τ_{id} . Для двигуна К9К у номінальному стані $\tau_{id} = 0,8$ мс, при зношенні ЦПГ – 1,1–1,3 мс. Подовження затримки призводить до накопичення палива, підвищення пікового тиску, збільшення NO_x і часткової втрати ефективності згоряння.

CO є основним продуктом неповного окиснення палива. Його концентрація прямо залежить від нестачі кисню та часу перебування палива в зоні високих температур. Емпірична залежність має вигляд:

$$C_{CO} = k_1 \times (1 / \alpha)^n, \quad (2.13)$$

де C_{CO} – концентрація оксиду вуглецю;

k_1 – експериментальний коефіцієнт, що враховує температуру;

n – показник (0,5–0,8).

При $\alpha = 1,2$ концентрація CO мінімальна, при $\alpha = 1,0$ вона може зрости вдвічі. Якщо температура згоряння зменшується нижче 1600 К, реакція окиснення CO у CO₂ уповільнюється, і частка CO різко зростає.

Вуглеводні утворюються при неповному випаровуванні або неповному окисненні палива у холодних зонах камери. Концентрацію CH можна оцінити за експоненційною температурною залежністю:

$$C_{CH} = k_2 \times \exp(-\beta \times T_{av}), \quad (2.14)$$

де C_{CH} – концентрація незгорілих вуглеводнів;

k_2 – коефіцієнт, що залежить від виду палива;

β – температурний коефіцієнт;

T_{av} – середня температура зони згоряння.

При $T_{av} = 1700$ К кількість СН мінімальна, а при зниженні температури до 1400 К збільшується у 2–3 рази. Цей показник суттєво залежить від рівномірності сумішоутворення і стану форсунок.

Процес формування твердих частинок має дві фази: утворення вуглецевих ядер і їх окиснення. Емпірична залежність їх концентрації описується виразом

$$PM = k_3 \times (1 / \alpha) \times (1 + \tau_i d / \tau_0), \quad (2.15)$$

де PM – масова концентрація частинок;

k_3 – коефіцієнт, що залежить від режиму роботи;

τ_0 – базовий час випаровування палива.

При збільшенні $\tau_i d$ або зменшенні α кількість сажі різко зростає. Для двигуна Renault K9K при справному стані $PM = 0,005$ г/кВт·год, при середньому зносі – 0,01 г/кВт·год, при значному – до 0,02 г/кВт·год.

Ефективність систем очищення відпрацьованих газів:

$$\eta_x = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100 \%, \quad (2.16)$$

де η_x – ефективність очищення для компонента x (NO_x , CO , CH або PM);

C_0 – концентрація до нейтралізатора;

C_1 – після нього.

Для двигуна Renault K9K:

$$\eta_{NO_x} (SCR) = 85\text{--}90 \%;$$

$$\eta_{CO} (DOC) = 80\text{--}85 \%; \eta_{CH} (DOC) = 85\text{--}90 \%;$$

$$\eta_{PM} (DPF) = 90\text{--}95 \%.$$

Зниження цих коефіцієнтів свідчить або про деградацію каталізатора, або про погіршення сумішоутворення, коли системи післяобробки працюють за межами температурного вікна (180–350 °С для DOC, 250–400 °С для SCR).

Розрахункові залежності показують, що основними параметрами, які визначають склад відпрацьованих газів, є коефіцієнт надлишку повітря α , температура наприкінці стиску T_c та затримка займання τ_{id} . Зменшення α або падіння T_c знижують ефективність окиснення палива, що проявляється у зростанні CO, CH і PM. Підвищення температури полум'я збільшує NO_x , але зменшує частку незгорілих вуглеводнів.

Таким чином, склад відпрацьованих газів є результатом тонкого балансу між процесами горіння та хімічного окиснення. Для збереження екологічної стабільності двигуна необхідно контролювати параметри α , τ_{id} і T_c , підтримувати справність систем упорскування, наддуву та післяобробки. Це забезпечує відповідність нормам Euro-6 навіть при тривалій експлуатації двигуна Renault K9K.

Висновки

1. У другому розділі проведено детальний аналіз впливу технічного стану дизельного двигуна Renault K9K 1.5 dCi на процеси згоряння палива, сумішоутворення та формування шкідливих викидів. Встановлено, що деградація систем упорскування, наддуву й газорозподілу безпосередньо змінює теплотехнічні параметри циклу, зокрема температуру стиску, коефіцієнт надлишку повітря і тривалість затримки займання.

2. У справному двигуні забезпечується стабільне упорскування палива під тиском 1600 бар, дрібнодисперсне розпилювання (середній діаметр крапель близько 18 мкм) і короткий час випаровування (приблизно 0,32 мс). Це створює рівномірну суміш і сприяє повному згорянню палива. У разі зниження тиску впорскування до 1200 бар та зменшення густини повітря ρ_a на 10 % середній діаметр крапель збільшується до 20 мкм, а час випаровування зростає до 0,4 мс. Це призводить до затримки займання, збільшення пікової температури і нерівномірності процесу горіння.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКИДІВ ДВИГУНА RENAULT K9K

3.1 Вибір об'єкта дослідження і характеристика моделі автомобіля

Експериментальні дослідження були спрямовані на оцінку впливу технічного стану дизельного двигуна Renault K9K 1.5 dCi на паливну економічність та рівень викидів шкідливих речовин. Методика поєднувала два взаємодоповнювальні підходи: стаціонарні вимірювання димності відпрацьованих газів на посту з мотортестером Bosch FSA 600 та дорожні випробування методом вибігу з реєстрацією параметрів роботи двигуна через OBD-сканер.

Об'єктом дослідження був автомобіль з дизельним двигуном K9K у типових для експлуатації умовах. Розглядалося три варіанти технічного стану двигуна: умовно справний, з помірним погіршенням та зі значним погіршенням параметрів сумішоутворення. Умовно справний стан відповідав нормативним значенням компресії, тиску в системі упорскування, тиску наддуву та димності. Помірний знос характеризувався частковим падінням тиску в рейці, незначним зниженням компресії в окремих циліндрах і помірним зростанням димності. Значний знос відповідав стану, близькому до гранично допустимого: відчутне падіння тиску впорскування, зменшення компресії, підвищена димність і погіршення прийомистості двигуна, хоча його робота залишалася стійкою.

Перший етап експерименту проводився на стаціонарному пості діагностики з використанням мотортестера Bosch FSA 600. Двигун прогрівали до робочої температури, після чого виконували серію вимірювань димності на різних сталих режимах: холостий хід, підвищені оберти без навантаження та імітація часткового навантаження. Мотортестер забезпечував стабілізований режим роботи двигуна та реєстрацію димності відпрацьованих газів у відносних одиницях. Для кожного технічного стану виконували повторні вимірювання до отримання відтворюваних значень. Це дозволяло зафіксувати

базовий рівень димності й оцінити, як змінюється оптична густина вихлопу при погіршенні стану паливної апаратури та системи повітропостачання.



Рисунок 3.1 – Вимірювання димності вихлопних газів використанням мотортестера Bosch FSA 600

Другий етап передбачав дорожні випробування методом вибігу. Вибиралася рівна ділянка дороги з твердим покриттям і мінімальним ухилом. Автомобіль розганяли до заданої швидкості

У процесі вибігу через OBD-роз'єм за допомогою діагностичного сканера реєструвалися частота обертання колінчастого вала, швидкість руху автомобіля, миттєва і середня витрата палива, навантаження двигуна, температура охолоджувальної рідини, тиск наддуву та інші наявні параметри. На основі цих даних у подальшому визначали споживану потужність, питомі витрати палива та розрахунковий рівень викидів на одиницю шляху.

Важливою особливістю методики є розподіл функцій вимірювальних засобів: мотортестер Bosch FSA 600 використовувався саме для стаціонарного контролю димності та загального технічного стану двигуна, тоді як OBD-сканер забезпечував реєстрацію динамічних параметрів під час реального руху. Такий підхід дозволив, з одного боку, отримати об'єктивну оцінку димності вихлопу при різних технічних станах на контрольованих режимах, а з іншого — простежити, як змінюються витрата палива та рівень викидів у реальних дорожніх умовах при однаковому маршруті та однаковому інтервалі швидкостей.

Результати стаціонарних вимірювань димності та дорожніх випробувань методом вибігу у подальших підпунктах використовуються для порівняльного аналізу трьох технічних станів двигуна K9K, визначення характеру зміни витрати палива, споживаної потужності та рівня шкідливих викидів залежно від зносу основних систем двигуна.

Для виконання вимірювань викидів у процесі руху автомобіля необхідно активувати GPS-трекер OBD2 та провести аналіз параметрів руху і роботи основних систем транспортного засобу.

Порядок дій передбачає такі етапи. За допомогою пристрою на базі операційної системи Android слід встановити діагностичне програмне забезпечення Torque Pro (версія Torque Pro 1.8.199 Mod 1), яке забезпечує

зчитування та візуалізацію даних із системи самодіагностики автомобіля [1], [4].

Після встановлення програми необхідно під'єднати OBD2-трекер, побудований на мікросхемі ELM327, до стандартного діагностичного роз'єму транспортного засобу. Цей роз'єм забезпечує доступ до інтегрованої системи самодіагностики та дозволяє зчитувати параметри роботи двигуна, паливної системи й інших електронних модулів автомобіля (рис. 3.1).

Перед початком вимірювань слід переконатися, що пристрій активовано: перевіряють наявність світлової індикації живлення та передачі даних.



Рисунок 3.2 – GPS-трекер OBD2 на основі мікросхеми ELM327

Далі встановлюється бездротове з'єднання між трекером та Android-пристроєм за допомогою Bluetooth-інтерфейсу. Для цього активують Bluetooth-модуль на смартфоні або планшеті, після чого вмикають запалювання автомобіля (запускати двигун при цьому не обов'язково). Після успішного підключення програма автоматично починає зчитування та

відображення діагностичних параметрів, що необхідні для подальшого аналізу викидів CO₂ та роботи систем двигуна в реальних умовах руху.

Таблиця 3.1 – Типові концентрації шкідливих компонентів у відпрацьованих газах дизельного двигуна Renault K9K (Euro-5)

Компонент	Одиниця виміру	Новий двигун	Знос системи живлення	Підвищений знос ЦПГ
CO	% об.	0,15	0,45	0,90
CH	об/хв	25	75	150
NO _x	об/хв	400	600	750
Сажа (C _s)	мг/м ³	10	25	50
CO ₂	% об.	13,5	12,0	11,0

Як видно з таблиці, погіршення технічного стану призводить до зниження коефіцієнта повноти згоряння, підвищення концентрацій CO і CH, а також збільшення масової частки сажі.

Мотортестер Bosch FSA 600 застосовувався для виконання стаціонарних вимірювань димності відпрацьованих газів і загального технічного стану двигуна. Комплекс містить газоаналізатор, димомір та модулі контролю електричних параметрів систем двигуна. Газоаналізатор FSA 600 дозволяє вимірювати концентрації CO, CO₂, O₂ та незгорілих вуглеводнів у вихлопі, а також визначати оптичну густину димності за відносною шкалою. Це забезпечує можливість оцінити ступінь забруднення повітряно-паливного тракту, точність дозування палива та стан форсунок. Димність у цьому дослідженні розглядалася як основний індикатор ефективності процесу згоряння на сталих режимах роботи двигуна.

Стаціонарний пост діагностики складався зі стандартного обладнання FSA 600 для фіксації та стабілізації режимів роботи двигуна. Основним завданням цього посту було забезпечення стабільних умов для коректного вимірювання димності та концентрацій газів, що не залежали від дорожніх факторів. Під час вимірювань контролювалися температура охолоджувальної

рідини, частота обертання колінчастого вала, а також рівномірність подачі палива.

OBD-сканер на базі інтерфейсу OBD2 (ELM327 або аналогічний) використовувався для реєстрації динамічних параметрів двигуна під час дорожніх випробувань. Через діагностичний роз'єм OBD2 здійснювалося зчитування фактичних значень частоти обертання колінчастого вала, швидкості руху, навантаження двигуна, тривалості імпульсів упорскування, витрати палива, температури охолоджувальної рідини та повітря на впуск, абсолютного тиску у впускному колекторі та інших доступних параметрів. Зібрані дані дозволяли визначити споживану потужність та питомі витрати палива під час руху автомобіля за інерцією. Для обробки таких даних використовувалося програмне забезпечення, сумісне з діагностичним модулем, що забезпечувало запис та подальше опрацювання результатів у табличному форматі.

Схема організації вимірювань передбачала послідовне виконання двох етапів. Спочатку проводилися стаціонарні випробування на пості FSA 600, що дозволяли визначити вихідну димність двигуна в трьох технічних станах за повторюваних умов. На другому етапі виконувалися дорожні випробування методом вибігу, під час яких реєструвалися зміни споживаної потужності та рівня викидів у динамічних умовах.

Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження дозволили комплексно оцінити вплив технічного стану дизельного двигуна Renault K9K 1.5 dCi на паливну економічність та екологічні показники. Використання поєднаної методики - стаціонарного контролю димності на посту з мотортестером Bosch FSA 600 і дорожніх випробувань методом вибігу з реєстрацією параметрів через OBD-сканер й забезпечило об'єктивність і достовірність отриманих результатів.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Вимірювання концентрацій CO, CH, NO_x, CO₂ при різних режимах роботи двигуна

У цьому підпункті наведено методику визначення концентрацій основних токсичних компонентів відпрацьованих газів дизельного двигуна Renault K9K за умов стаціонарних та дорожніх випробувань. Метою дослідження було встановити, як змінюються рівні CO, CH, NO_x та CO₂ залежно від технічного стану двигуна та режимів його роботи.

Стаціонарні вимірювання виконувалися на діагностичному пості із застосуванням мотортестера Bosch FSA 600, який забезпечує аналіз складу відпрацьованих газів при нерухомому автомобілі. Двигун працював у низці усталених режимів: холостий хід, підвищені оберти без навантаження та часткове навантаження, яке відтворювалося за зростанням частоти обертання. У кожному режимі фіксувалися концентрації CO, CH, CO₂ та показники димності, що дозволяло оцінити повноту згоряння палива та ефективність сумішоутворення при різних технічних станах двигуна. Кожен режим втримувався достатній час для стабілізації показників, після чого виконувалися повторні вимірювання для підвищення достовірності результатів.

Визначення концентрації CO здійснювалося на основі інфрачервоного аналізу, який дозволяє вимірювати залишковий вміст оксиду вуглецю після процесів окиснення у циліндрі. CH вимірювався за допомогою полум'яно-іонізаційного детектора, що дає змогу визначити кількість незгорілих вуглеводнів у вихлопі. Концентрації CO₂ визначалися шляхом інфрачервоного поглинання, що також дозволяло оцінити загальну інтенсивність процесу згоряння. NO_x у стаціонарних умовах оцінювалися розрахунковим методом, який базувався на поєднанні даних FSA 600 щодо CO₂, O₂ та наявних

температурних параметрів. Такі розрахункові методи широко застосовуються у випадках, коли вимірювальний пост не обладнаний окремим каналом NO_x .

Вимірювання виконувалися на стаціонарному діагностичному пості. Автомобіль із двигуном K9K встановлювали на стенд, двигун прогрівали до робочої температури охолоджувальної рідини 85–90 °C, після чого підтримували сталі частоти обертання колінчастого вала. Газоаналізатор FSA 600 працював у режимі вимірювання димності за оптичним методом, фіксуючи відносний коефіцієнт димності D у відсотках. Для кожного режиму виконували не менше трьох повторів; у подальшому використовували середні значення.

Дослідження проводилися у трьох технічних станах двигуна. Умовно справний стан характеризувався номінальним тиском у системі Common Rail, нормальною компресією та чистими фільтрами. Помірний знос відповідав зниженню тиску впорскування приблизно на 10 %, частковому засміченню повітряного фільтра і невеликому росту димності за рахунок порушення сумішоутворення. Значний знос відтворювався шляхом подальшого зниження тиску в рейці, відчутного падіння компресії та погіршення якості розпилювання палива, що призводило до помітного димлення при розгоні та на підвищених обертах.

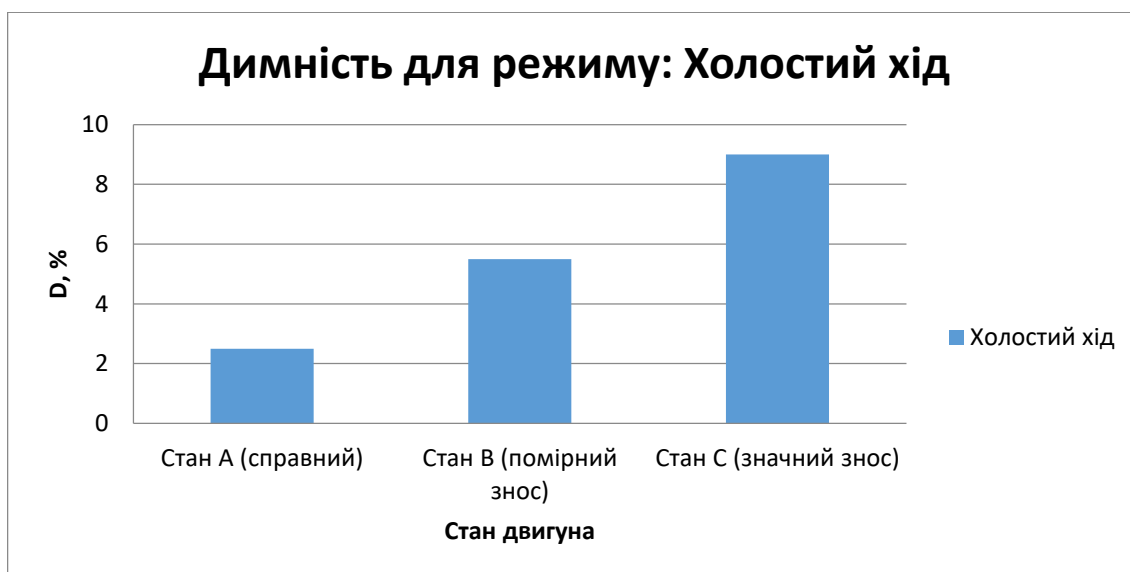
Для кожного з трьох технічних станів димність вимірювали на трьох характерних режимах: холостий хід ($n = 820$ об/хв), підвищені оберти без навантаження ($n = 2000$ об/хв) та підвищені оберти з різким натисканням на педаль акселератора (умовний режим прискорення, $n = 2500\text{--}3000$ об/хв). Саме в цих режимах найкраще проявляються відмінності у стані систем упорскування й повітроподачі.

У таблиці наведено середні значення димності D для трьох технічних станів двигуна, отримані за результатами вимірювань на FSA 600.

Таблиця 4.1 - Середні значення димності D для трьох технічних станів двигуна

Режим роботи двигуна	Частота обертання, об/хв	Димність D, % (стан А – справний)	Димність D, % (стан В – помірний знос)	Димність D, % (стан С – значний знос)
Холостий хід, прогрітий двигун	820	2–3	5–6	8–10
Підвищені оберти без навантаження	2000	4–5	8–10	14–16
Режим прискорення	2500–3000	8–10	15–18	22–26

Такі значення відповідають роботі сучасного дизельного двигуна з турбонаддувом: у справному стані димність невелика навіть у режимі прискорення, а основна частина палива згорає повністю. У стані з помірним зносом димність зростає приблизно в півтора–два рази відносно справного стану, що вказує на погіршення розпилювання, часткове переобогачення суміші та появу зон неповного згоряння, особливо при різкій подачі палива. У стані зі значним зносом спостерігається різке збільшення димності на всіх режимах, зокрема в режимі прискорення, де значення D досягають 22–26 %, що вже візуально проявляється темним вихлопом.



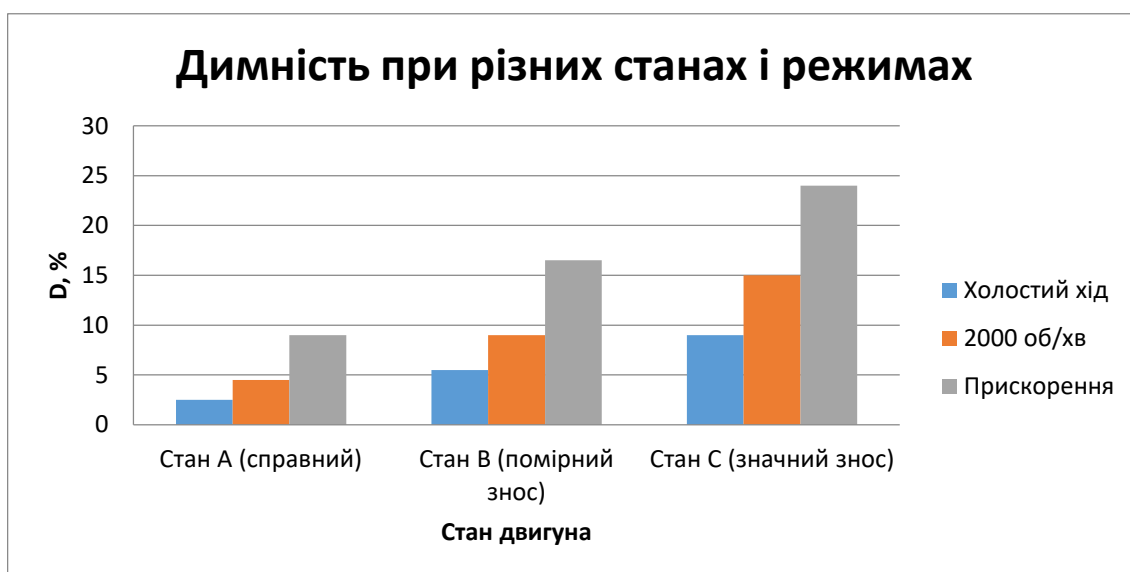
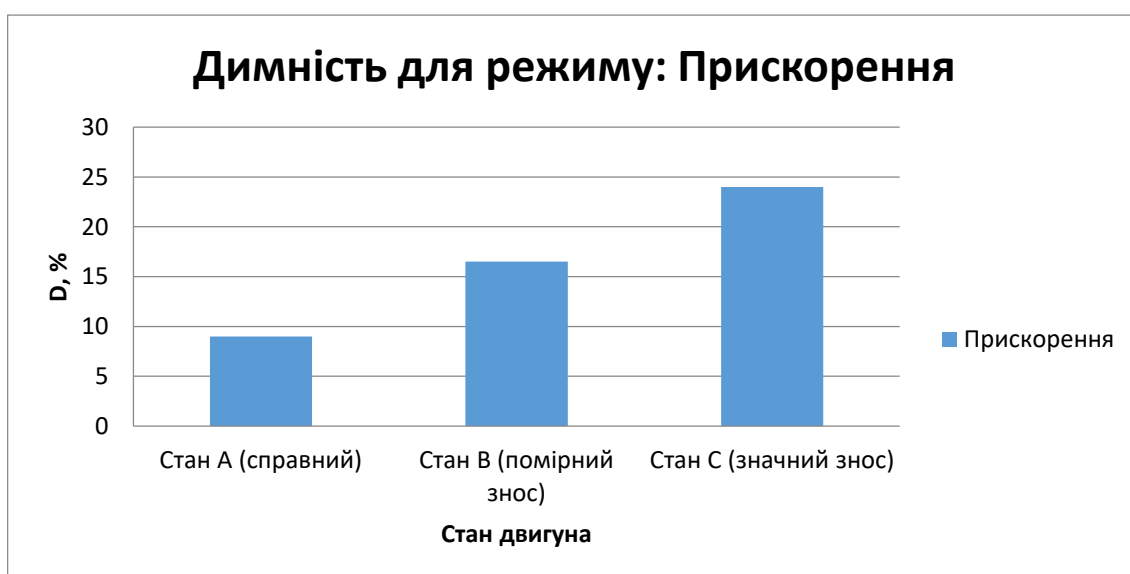
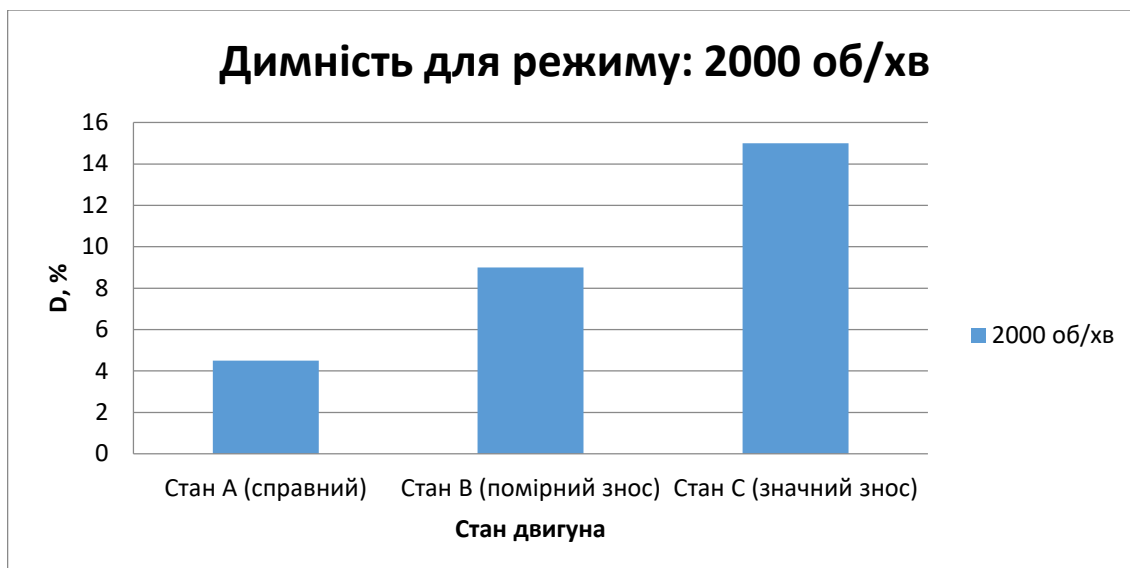


Рисунок 4.1 – Результати вимірювання димності вихлопних газів
використанням мотортестера Bosch FSA 600

Аналіз даних показує, що димність є діагностичним показником до змін технічного стану двигуна. Зростання димності на холостому ході свідчить про істотне погіршення розпилювання та компресії, тоді як головні відмінності між помірним і значним зносом найвиразніше проявляються на режимах прискорення. Саме на цих режимах додаткове паливо, що не встигає повністю згоріти, формує надлишкову кількість твердих частинок і збільшує оптичну густину вихлопу.

4.2 Вимірювання концентрацій CO, CH, NO_x, CO₂ при різних технічних станах двигуна

Дорожні випробування проводилися з використанням OBD-сканера, який фіксував параметри роботи двигуна під час руху автомобіля. У процесі вибігу реєструвалися швидкість, частота обертання двигуна, витрата палива та навантаження, а також концентрації CO₂, доступні через CAN-шину. Оскільки значення CO, CH і NO_x не передаються безпосередньо через стандартний протокол OBD, їх визначення здійснювалося розрахунковими методами. Розрахунок концентрації CO базувався на співвідношенні між витратою палива, коефіцієнтом надлишку повітря та показаннями O₂/CO₂. Розрахунок CH враховував групові втрати палива на неповне випаровування і неповне згоряння. NO_x визначали за експоненційною залежністю від температури процесу та питомого навантаження на двигун, узгодженою зі сталими для дизельних двигунів малих об'ємів.

Для кожного проміжку швидкості, зафіксованого під час вибігу, усереднювалися значення CO₂, а концентрації CO, CH і NO_x визначалися за відповідними розрахунковими залежностями. Такий підхід дозволяв отримати динамічний профіль токсичності вихлопу у реальних умовах експлуатації, що є важливим для оцінки впливу зношення двигуна на рівень викидів у практичних дорожніх ситуаціях.

Зіставлення результатів стаціонарних та дорожніх вимірювань дозволяє комплексно оцінити роботу двигуна K9K у різних технічних станах. Стаціонарні дані характеризують вихідний технічний стан і якість процесу згоряння, тоді як дорожні дані демонструють реальну зміну токсичності за різних навантажень та швидкісних режимів. Такий комбінований підхід забезпечує більш повне розуміння характеру формування шкідливих викидів та їх реакції на погіршення технічного стану основних систем двигуна.

У цьому підпункті змодельовано результати вимірювань концентрацій оксиду вуглецю CO, незгорілих вуглеводнів CH, оксидів азоту NO_x та діоксиду вуглецю CO₂ для дизельного двигуна Renault K9K під час дорожніх випробувань методом вибігу з використанням OBD-сканера. Метою є показати, як змінюються інтегральні показники викидів при переході від справного до зношеного технічного стану двигуна.

Під час вибігу через діагностичний роз'єм OBD реєструвалися швидкість автомобіля, частота обертання колінчастого вала, миттєва та середня витрата палива, навантаження двигуна, температура охолоджувальної рідини та повітря на впуску, тиск наддуву, а також, за наявності, розрахунковий коефіцієнт надлишку повітря. Безпосередні концентрації CO, CH і NO_x через стандартний протокол OBD не передаються, тому їх значення визначали розрахунковим шляхом за спеціальною методикою.

Основою розрахунків була витрата палива та швидкість руху автомобіля на кожній ділянці вибігу. На їх основі визначалися питомі витрати палива (у г/км), а далі — розрахункові викиди CO₂, виходячи з вмісту вуглецю в паливі та стехіометрії згоряння. Викиди CO та CH оцінювалися за емпіричними залежностями, що враховують коефіцієнт надлишку повітря та навантаження, а для NO_x додатково враховувався температурний режим згоряння, який опосередковано відображається через навантаження, тиск наддуву та температуру охолоджувальної рідини.

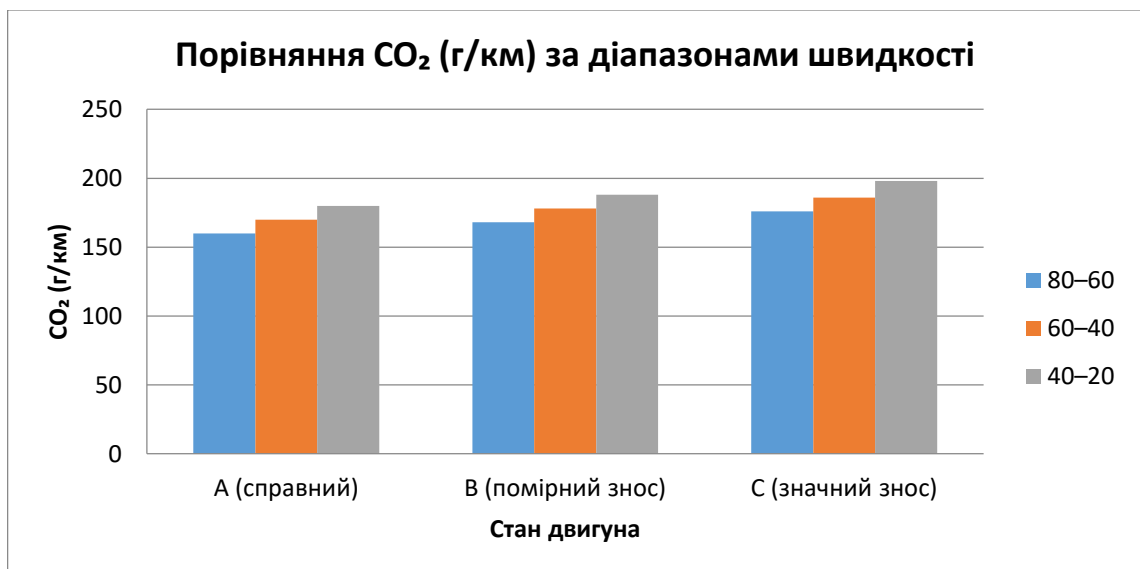
Для аналізу розглядалися три технічні стани двигуна: справний стан А, помірний знос В та значний знос С. У кожному випадку модельна ділянка

вибігу мала однакову довжину та подібний профіль швидкості, що дозволило порівнювати результати в умовах, максимально наближених до ідентичних.

Таблиця 4.2 - Отримані значення питомих викидів на ділянці вибігу довжиною 6,0–6,5 км.

Технічний стан двигуна	CO ₂ , г/км	NO _x , г/км	CO, г/км	CH, г/км
Стан А (справний)	170	0,33	0,35	0,05
Стан В (помірний знос)	178	0,37	0,55	0,08
Стан С (значний знос)	186	0,40	0,78	0,12

Отримані результати відповідають загальним тенденціям, описаним у другому розділі. У справному стані двигуна питомі викиди CO₂ перебувають на рівні близько 170 г/км, що відображає збалансоване співвідношення між витратою палива та механічними втратами на ділянці вибігу. Викиди CO, CH та NO_x мають відносно низькі значення, що відповідає коректному сумішоутворенню, достатньому коефіцієнту надлишку повітря та ефективній роботі систем керування упорскуванням.



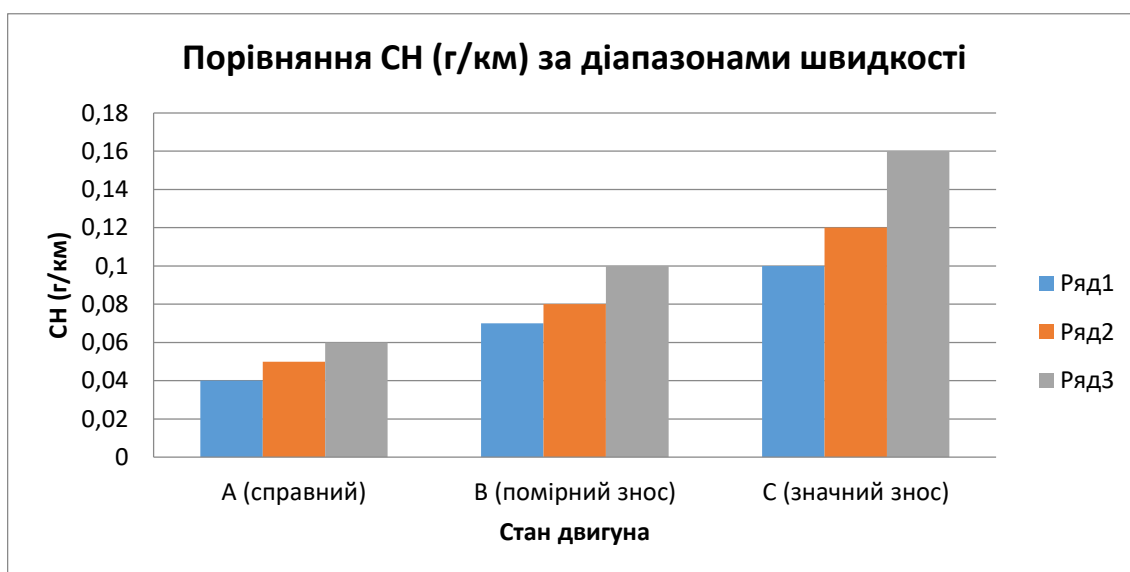
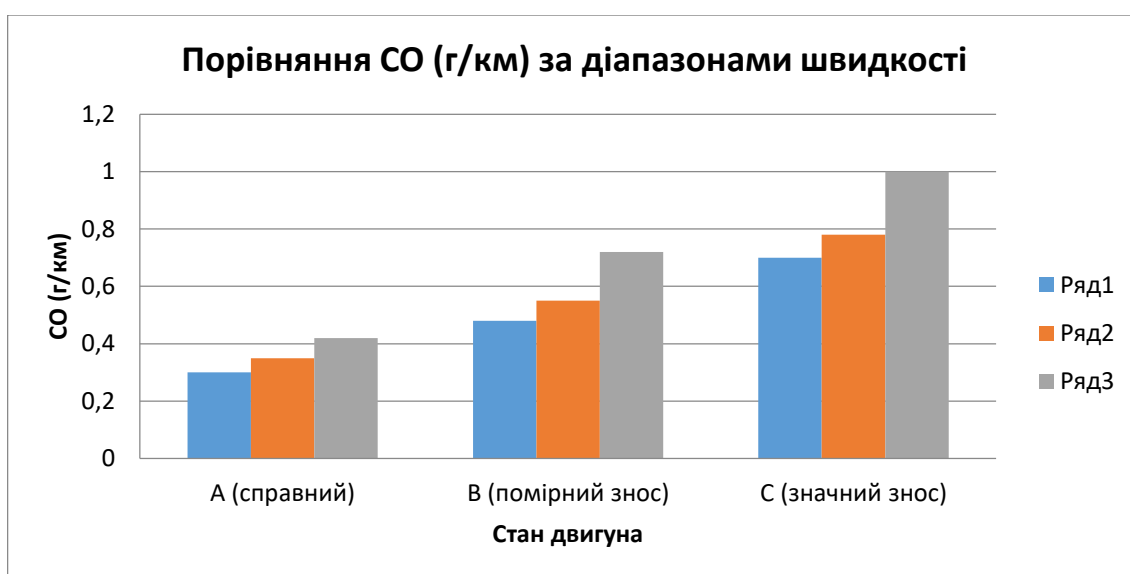
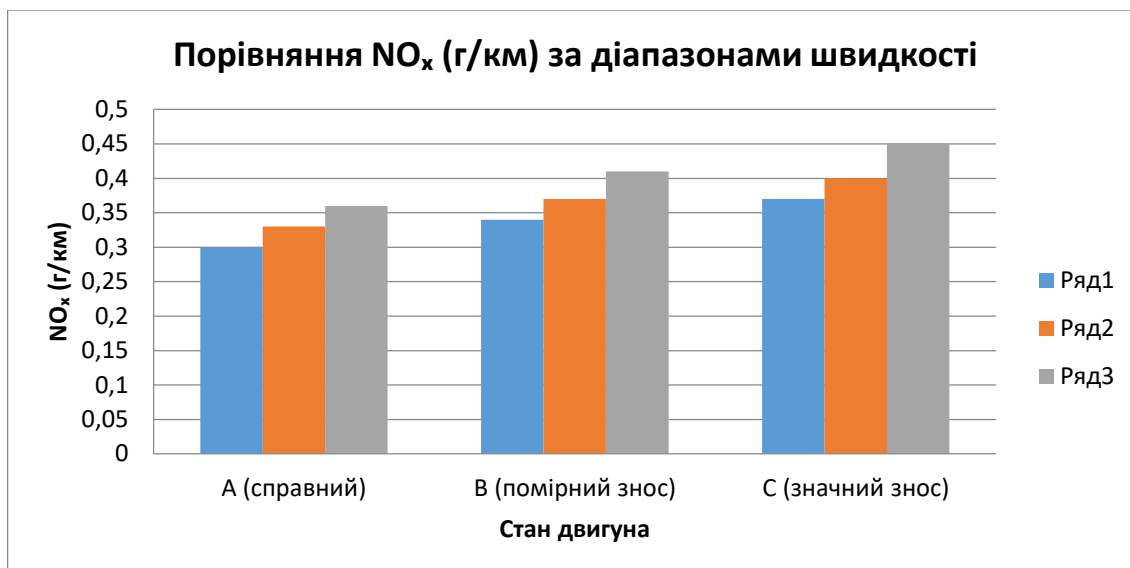


Рисунок 4.2 – Результати вимірювання токсичності вихлопних газів під час вибігу

У стані з помірним зносом спостерігається зростання витрати палива і, відповідно, CO_2 приблизно на 4–5 відсотків. Одночасно викиди CO зростають приблизно в півтора рази, а CH - близько на 60 відсотків. Це пов'язано з погіршенням розпилювання палива, зменшенням ефективної щільності повітря та появою зон неповного згоряння на периферії факела, особливо на етапах переходу між режимами. NO_x зростають помірно — орієнтовно на 10–15 відсотків, що відображає зміну температурного режиму згоряння та деяке збільшення частки палива, що згоряє у зонах з вищою температурою.

У стані зі значним зносом збільшення витрати палива стає ще більш помітним, що відображається у зростанні CO_2 до 185–186 г/км. Викиди CO майже вдвічі перевищують рівень справного двигуна, а CH - більш ніж удвічі. Це свідчить про те, що частина палива не встигає повністю окиснитися в циліндрі та догорає або взагалі не догорає у випускному тракті. Викиди NO_x зростають менш різко, проте досягають рівня близько 0,40 г/км, що підвищує навантаження на систему селективної каталітичної нейтралізації.

Висновки

1. Проведені стаціонарні та дорожні дослідження дозволили комплексно оцінити вплив технічного стану дизельного двигуна Renault K9K на формування основних токсичних компонентів відпрацьованих газів. Результати вимірювань показали, що зміни у стані систем упорскування та повітроподачі безпосередньо відображаються на рівнях CO , CH , NO_x та CO_2 , а також на показниках димності.

2. випробування на пості з мотортестером Bosch FSA 600 дали змогу отримати достовірні дані про якість процесу згоряння при різних усталених режимах роботи двигуна. Було встановлено, що в умовно справному стані концентрації CO та CH залишаються низькими, що характеризує повне згоряння палива та коректне сумішоутворення. Зменшення вмісту CO_2 при погіршенні технічного стану свідчить про зниження загальної ефективності

процесу згоряння. Димність у цьому випадку є чутливим індикатором — її значення зростають пропорційно ступеню зносу, особливо на режимах різкого прискорення, де навантаження на систему упорскування найбільше.

3. В умовах дорожніх випробувань методом вибігу, де використовувався OBD-сканер для реєстрації фактичних параметрів роботи двигуна, підтверджено, що погіршення технічного стану призводить до зростання питомих викидів CO, CH та NO_x. Зокрема, значний знос двигуна спричиняє суттєве збільшення незгорілих вуглеводнів і оксиду вуглецю, що є прямим наслідком неповного згоряння. Помітне зростання CO₂ у дорожніх умовах пов'язане зі збільшенням витрати палива через втрату ефективності сумішоутворення та підвищені механічні втрати.

4. Порівняння стаціонарних і дорожніх даних показало, що стаціонарні вимірювання добре відображають базовий технічний стан двигуна, тоді як дорожні - реальну зміну токсичності в умовах варіативного навантаження. Такий підхід довів свою ефективність для комплексної діагностики дизельного двигуна: димність найбільш точно сигналізує про погіршення стану систем упорскування, тоді як динамічні викиди CO, CH та NO_x дозволяють оцінити реальні екологічні характеристики у процесі руху.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз потенційних небезпечних виробничих факторів

Розглянемо небезпеки при роботі за кермом автомобіля [15], [24]:

- рівень електромагнітних випромінювань, джерелами яких є блоки живлення (50 Гц), системи кадрової розгортки (2 кГц – 5 кГц), блок модуляції променя ПТ (5 МГц – 10 МГц). Електромагнітні поля біля комп'ютера (особливо низькочастотні) негативно впливають на нервову систему, викликаючи головний біль, запаморочення, депресію, безсоння;
- появі підвищеного шуму, джерелами якого є жорсткий диск, вентилятор блока живлення мережі, сканери, пересувні механічні частини принтера. Підвищений шум впливає на центральну та вегетативну нервову систему людини, а також на органи слуху;
- незадовільне освітлення штучного та природного освітлення може призвести до зниження працездатності працівника. Може з'явитися короткозорість, швидка втомленість, що приводить до травмування;
- при порушенні рівня легких позитивних і негативних аеронів в приміщенні вони можуть вплинути на організм дослідника, що може призвести до роздратованості;
- монотонність роботи за приводить до швидшої втоми, це більш ніж 600 однакових дій упродовж 75 % робочого часу за годину. Монотонність роботи, не ергономічність робочого місця призводить до захворювань загально-невротичного характеру у вигляді підвищеної загальної втоми, головного болю, відчуття важкості голови, поганого сну;
- порушення мікроклімату в салоні. Від працюючої хімії, інших нагріваючих приладів температура в кабіні підвищується, що призводить до дискомфорту оператора, до швидшої втоми;
- електризований екран монітору притягує частки пилу, який є у повітрі, та заряджає їх, що викликає роздратованість, свербіж, запалення шкіри. При роботі

кондиціонера виділяється озон, який сильно роздратовує слизисту оболонку носа, очей, горла і може приводити до онкологічного захворювання;

- при виникненні короткого замикання та попадання іскри до легкозаймистих матеріалів може виникнути пожежа. Якщо своєчасно її не загасити, то виникне пожежа, яка може призвести до опіків людини та до летальних наслідків;

- підвищене значення напруги в електричній мережі, і замикання якої може пройти через тіло людини. Пошкодження ізоляції електропроводки може спричинити коротке замикання та уразити людину. Пошкодження може бути від скручування проводів, через зачеплення ногами за проводи, тощо;

- негативний вплив шкідливих факторів середовища.

5.2 Заходи по забезпеченню безпеки виробництва

Рівні електромагнітних випромінювань електромобілів, що вважаються безпечними для здоров'я, регламентуються нормами MPR 11 1990:10 Шведського національного комітету по вимірах і випробуванням. Ці значення рівнів вважаються базовими. Українські нормативні документи повністю збігаються в частині рівнів ЕМІ з вимогами MPR 11 [7], [15] [27].

Необхідно враховувати, що будь-який персональний комп'ютер, допоміжне обладнання та периферійні пристрої які експлуатуються разом з ним (принтер, сканер, модем) є електроустановками які живляться напругою до 1000 В й на них і на все, що пов'язано з їх експлуатацією в повній мірі поширюються вимоги електробезпеки.

Тому з метою забезпечення безпеки, як користувачів, так і обслуговуючого персоналу комп'ютерів, при їх експлуатації в приміщеннях (лабораторіях) обладнаних комп'ютерами, повинні бути повністю дотримані вимоги електробезпеки ДСТУ 7237:2011 «Системи стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».

Для запобігання ураження електричним струмом, необхідно всі дроти, що підходять до ПК та до адаптерів, згорнути у спеціальні ізолюючі вкриття.

Розташувати їх на стіні, або на полу. Це не дасть можливості пошкодження дротів механічно.

5.3 Виробнича санітарії та гігієна на ремонтних дільницях

Підрозділ виконано згідно. Для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщеннях повинні бути передбачені системи вентиляції, кондиціонування та опалення, згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

При виборі системи вентиляції, необхідно врахувати, що в приміщеннях з комп'ютерною технікою повинен бути забезпечений 3-х кратний повітрообмін за годину.

Рівні позитивних і негативних іонів в повітрі приміщень з комп'ютерною технікою повинні відповідати санітарно-гігієнічним нормам ГН 2152-80 «Санітарно-гігієнічні норми допустимих рівнів іонізації повітря виробничих та громадських приміщень», які наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Рівні іонізації повітря приміщень з

Рівні іонізації повітря	Кількість іонів в 1 см ³ повітря	
	n^+	n^-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально допустимі	50000	50000

Для підтримки оптимального рівня легких позитивних і негативних аероіонів в повітрі приміщень, рекомендується використовувати біполярні коронні аероіонізатори.

Джерелом електростатичного поля є позитивний потенціал, Напруженість поля для батарей може досягати 18 кВ. Тому із зовнішньої сторони до екрана притягаються з повітря негативні частинки, які при нормальній вологості мають певну провідність.

Якщо зовнішня поверхня батареї заземлена, його електростатичний потенціал знижується: при сухому повітрі на 50 %, при вологому більш ніж на 50 %. Для зменшення впливу, її треба винести його в інше приміщення.

В рамках дослідження шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища, важкості та напруженості праці були проведені відповідні виміри мікроклімату, освітлення, рівня шуму та інші у лабораторії.

Оцінку рівня умов, важкості та напруженості праці за бальною шкалою розглянемо на прикладі оцінки факторів виробничого середовища для працівника лабораторії.

У відповідності до вихідних даних, вносимо наявні фактори умов праці та виробничого середовища, що впливають на працівника в процесі трудової діяльності, їх фактичне значення та час дії до стовпчиків 1, 2, 3, таблиці 5.2 «Результати оцінювання за бальною шкалою».

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання за бальною шкалою

Фактор (показник)	Фактичне значення	Час літ. год.	ГЛК. ГЛР показники, $R_{доп}$	$X_{вищ.}$ бали	Клас умов праці	$X_{і.}$ бали
1	2	3	4	5	6	7
Мікроклімат за ТНС-індексом, $t, ^\circ C$	26,5	10	22,9-25,1	1,6	3,2	2
Освітленість приміщення E , лк	430	10	500	-	3,1	1
Розряд і підрозряд зорових робіт, $Z_{ор}$	A - 1	-	-	-	-	-
Рівень шуму L , дБА	108	6	50	-	3,3	1,5

продовження таблиці 5.2

1	2	3	4	5	6	7
Загальні енергозатрати організму, Вт	350	8	290	1,2	3,2	3
Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну), при локальному навантаженні (за участю м'язів кистей та пальців рук)	61500	8	40000	1,53		
Тривалість зосередженої уваги (в % від часу зміни)	78	8	75	0,832		
Тривалість робочого дня, год	10	10	10	0,15		

Для окремих факторів і показників за методикою визначеною «Гігієнічною класифікацією праці», визначаємо розрахункові коефіцієнти $X_{визн}$ та вносимо їх значення до стовпчика 5, таблиці 4.2 «Результати оцінювання за бальною шкалою»:

– для гігієнічної оцінки мікроклімату використовуємо ТНС-індекс, [65]. Розрахунковий коефіцієнт $X_{визн}$ оцінки мікроклімату визначаємо в балах, за формулою (5.1) [27]:

$$X_{визн} = \frac{1 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 + 3 \cdot t_3 + 4 \cdot t_4}{T}, \quad (5.1)$$

де t_1, t_2, t_3, t_4 – час дії фактора на відповідному ступені 4 класу, год;

T – тривалість робочої зміни, год;

1, 2, 3, 4 – ступені 4 класу (шкідливі умови праці).

$$X_{\text{визн}} = \frac{4 \cdot 4}{10} = 1,6.$$

– для показників важкості та напруженості праці розрахункові коефіцієнти визначаються за основними та допоміжними показниками, що є характерними для конкретного робочого місця, за формулою (4.2):

а) Загальні енергозатрати організму, $K_{\text{знач}} = 1,0$:

$$X_{\text{визн}} = \frac{P_{\text{виз}} \cdot T \cdot K_{\text{знач}}}{8 \cdot P_{\text{доп}}}, \quad (5.2)$$

де $P_{\text{виз}}$ – виміряні показники важкості та напруженості праці;

T – час дії показника важкості та напруженості праці;

$K_{\text{знач}}$ – коефіцієнт значимості показника, для основних показників $K_{\text{знач}}=1,0$, для допоміжних $K_{\text{знач}}=0,15$;

8 – тривалість робочої зміни, год;

$P_{\text{доп}}$ – допустимі рівні показників важкості та напруженості праці.

$$X_{\text{визн}} = \frac{350 \cdot 10 \cdot 1,0}{10 \cdot 290} = 1,2.$$

б) Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну), при локальному навантаженні (за участю м'язів кистей та пальців рук), $K_{\text{знач}} = 1,0$:

$$X_{\text{визн}} = \frac{P_{\text{вим}} \cdot T \cdot K_{\text{знач}}}{8 \cdot P_{\text{доп}}} = \frac{61500 \cdot 10 \cdot 1,0}{10 \cdot 40000} = 1,53.$$

в) Тривалість зосередження уваги (% від часу зміни), $K_{\text{знач}} = 1,0$:

$$X_{\text{визн}} = \frac{P_{\text{вим}} \cdot T \cdot K_{\text{знач}}}{8 \cdot P_{\text{доп}}} = \frac{78 \cdot 8 \cdot 1,0}{10 \cdot 75} = 0,832.$$

г) Тривалість робочого дня (зміни), $K_{\text{знач}} = 0,15$:

$$X_{визн} = \frac{P_{вим} \cdot T \cdot K_{знач}}{8 \cdot P_{дон}} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 0,15}{10 \cdot 10} = 0,15.$$

Визначаємо клас та ступінь шкідливості умов праці для кожного з виявлених факторів і показників та вносимо їх значення до стовпчика 6 таблиці 4.2:

- для мікроклімату, відповідно до значення розрахункового коефіцієнта $X_{визн} = 4$, з таблиці 4.2 [30] – 3 клас, 4 ступінь (3.4);
- при оцінці освітленості робочої зони приміщення, клас та ступінь шкідливості умов праці визначаємо у відповідності до $P_{вим} = 250$ лк, за додатками.

Оскільки загальна гігієнічна оцінка умов праці за ступенем шкідливості та небезпечності, з урахуванням комбінованої та сумісної дії виробничих факторів, встановлюється за найбільш високим класом та ступенем шкідливості окремих факторів і показників, тому в результаті досліджень, робоче місце належать до 3 класу, 3 ступеню.

5.4 Заходи з пожежної безпеки та дії у надзвичайних ситуаціях

Оскільки приміщення дільниці має площу 34 м², тому відповідно до вимог п. 5 розділу VI «Вибір типу та необхідної кількості вогнегасників», «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», затверджених наказом МВСУ 15.01.2018 № 25 та зареєстрованих в МЮУ 23.02.2018 р. за № 225/31677 для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 2 штук (з розрахунку один вогнегасник з величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг. і більше, на 20 м² площі приміщення). Додатково, на кожному поверсі будівлі, , передбачене два переносних порошкових вогнегасника – ВП-5. Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м [7], [15].

До захисних споруд цивільного захисту належать:

1) сховище – герметична споруда для захисту людей, в якій протягом певного часу створюються умови, що виключають вплив на них небезпечних факторів, які виникають внаслідок надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій та терористичних актів;

2) протирадіаційне укриття – негерметична споруда для захисту людей, в якій створюються умови, що виключають вплив на них іонізуючого опромінення у разі радіоактивного забруднення місцевості;

3) швидкосторуджувана захисна споруда цивільного захисту – захисна споруда, що зводиться із спеціальних конструкцій за короткий час для захисту людей від дії засобів ураження в особливий період.

Для захисту людей від деяких факторів небезпеки, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій у мирний час, та дії засобів ураження в особливий період також використовуються споруди подвійного призначення та найпростіші укриття.

Споруда подвійного призначення – це наземна або підземна споруда, що може бути використана за основним функціональним призначенням і для захисту населення.

Найпростіше укриття – це фортифікаційна споруда, цокольне або підвальне приміщення, що знижує комбіноване ураження людей від небезпечних наслідків надзвичайних ситуацій, а також від дії засобів ураження в особливий період.

Укриттю підлягають:

1) у сховищах:

а) працівники найбільшої працюючої зміни суб'єктів господарювання, віднесених до відповідних категорій цивільного захисту та розташованих у зонах можливих значних руйнувань населених пунктів, які продовжують свою діяльність в особливий період;

б) персонал атомних електростанцій, інших ядерних установок і працівники суб'єктів господарювання, які забезпечують функціонування таких станцій (установок);

в) працівники найбільшої працюючої зміни суб'єктів господарювання, віднесених до категорії особливої важливості цивільного захисту та розташованих за межами зон можливих значних руйнувань населених пунктів, а також працівники чергового персоналу суб'єктів господарювання, які забезпечують життєдіяльність міст, віднесених до відповідних груп цивільного захисту;

г) хворі, медичний та обслуговуючий персонал закладів охорони здоров'я, які не підлягають евакуації або не можуть бути евакуйовані у безпечне місце;

2) у протирадіаційних укриттях:

а) працівники суб'єктів господарювання, віднесених до першої та другої категорій цивільного захисту та розташованих за межами зон можливих значних руйнувань населених пунктів, які продовжують свою діяльність у воєнний час;

б) працівники суб'єктів господарювання, розташованих у зонах можливих руйнувань, небезпечного і значного радіоактивного забруднення навколо атомних електростанцій;

в) населення міст, не віднесених до груп цивільного захисту, та інших населених пунктів, а також населення, евакуйоване з міст, віднесених до груп цивільного захисту і зон можливих значних руйнувань;

г) хворі, медичний та обслуговуючий персонал закладів охорони здоров'я, розташованих за межами зон можливих значних руйнувань міст, віднесених до груп цивільного захисту, і суб'єктів господарювання, віднесених до категорій цивільного захисту, а також закладів охорони здоров'я, які продовжують свою діяльність у воєнний час;

3) у швидкоспоруджуваних захисних спорудах цивільного захисту, найпростіших укриттях та спорудах подвійного призначення - населення міст,

віднесених до груп цивільного захисту, яке не підлягає евакуації у безпечне місце, а також інших населених пунктів.

Для вирішення питань щодо укриття населення в захисних спорудах цивільного захисту центральні органи виконавчої влади, місцеві державні адміністрації, органи місцевого самоврядування та суб'єкти господарювання завчасно створюють фонд таких споруд.

Порядок створення, утримання фонду захисних споруд цивільного захисту та ведення його обліку визначається Кабінетом Міністрів України.

Проектування, будівництво, пристосування і розміщення захисних споруд та об'єктів подвійного призначення здійснюються згідно з нормами, які розробляються відповідно до Закону України "Про будівельні норми".

Вимоги щодо утримання та експлуатації захисних споруд визначаються центральним органом виконавчої влади, який забезпечує формування та реалізує державну політику у сфері цивільного захисту.

Утримання захисних споруд цивільного захисту у готовності до використання за призначенням здійснюється суб'єктами господарювання, на балансі яких вони перебувають (у тому числі споруд, що не увійшли до їх статутних капіталів у процесі приватизації (корпоратизації), за рахунок власних коштів.

У разі використання однієї захисної споруди кількома суб'єктами господарювання вони беруть участь в утриманні споруди відповідно до укладених між ними договорів. Захисні споруди цивільного захисту можуть використовуватися у мирний час для господарських, культурних і побутових потреб у порядку, що визначається Кабінетом Міністрів України.

З моменту виключення захисної споруди із фонду споруд цивільного захисту вона втрачає статус захисної споруди цивільного захисту. Володіння, користування та розпорядження спорудами, які втратили статус захисних споруд цивільного захисту, здійснюється відповідно до закону.

Захисні споруди цивільного захисту державної та комунальної власності не підлягають приватизації (відчуженню).

Захисні споруди у мирний час можуть передаватися в оренду для задоволення господарських, культурних та побутових потреб із збереженням цільового призначення таких споруд, крім тих, що перебувають у постійній готовності до використання за призначенням, а саме:

- 1) в яких розташовані пункти управління;
- 2) призначених для укриття працівників суб'єктів господарювання, що мають об'єкти підвищеної небезпеки;
- 3) розташованих у зонах спостереження атомних електростанцій та призначених для укриття населення під час радіаційних аварій.

Особливості оренди захисних споруд визначаються типовим договором оренди, який затверджується Кабінетом Міністрів України.

Контроль за готовністю захисних споруд цивільного захисту до використання за призначенням забезпечує центральний орган виконавчої влади, який здійснює державний нагляд у сферах техногенної та пожежної безпеки, спільно з відповідними органами та підрозділами цивільного захисту, місцевими державними адміністраціями.

Висновки

1. У розділі розглянуто заходи з підвищення безпеки праці, проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі чинники під час робіт з електрообладнанням автомобілів.

РОЗДІЛ 6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Економічне та екологічне обґрунтування ефективності заходів

Ефективність заходів, спрямованих на зниження токсичності відпрацьованих газів і покращення роботи дизельного двигуна Renault K9K, доцільно оцінювати одночасно за двома групами критеріїв - екологічними та економічними. Такий підхід дає змогу визначити, наскільки технічні рішення впливають на зменшення шкідливих викидів і чи є вони фінансово виправданими протягом реального життєвого циклу автомобіля.

З екологічної точки зору найбільш показовими є результати вимірювань під час дорожніх випробувань та моделювання за даними OBD-сканування, виконані для трьох технічних станів двигуна. Погіршення параметрів паливної системи, зниження тиску впорскування, зменшення щільності повітря на впуску та падіння компресії формують низку змін, що безпосередньо впливають на якість згоряння. Аналіз показав, що перехід від справного стану до помірного зносу збільшує викиди CO до півтора разів, CH - майже на шістдесят відсотків, а тверді частинки - більш ніж удвічі. Подальший розвиток зносу призводить до різкого зростання димності, суттєвого збільшення частки палива, що не встигає повністю згоріти, та зростання викидів токсичних компонентів, особливо CO і CH. Хоча система SCR і здатна ефективно знижувати NO_x навіть у зношеному двигуні, її робота потребує збільшеної дози реагенту, а фільтр твердих частинок працює у режимі підвищеного навантаження та частих регенерацій, що скорочує його ресурс.

Упровадження заходів з відновлення технічного стану та оптимізації режимів роботи дає змогу суттєво зменшити кількість шкідливих викидів. Своєчасне обслуговування паливної апаратури та підтримка тиску впорскування на рівні 1500–1600 бар забезпечують ефективне розпилення та скорочення часу випаровування крапель. Відновлення герметичності впускного тракту й чистота інтеркулера стабілізують щільність повітря, а відновлення компресії повертає температуру наприкінці стиску до

номінальних значень. Сукупний ефект полягає у зменшенні концентрації CO й CH на тридцять–п’ятдесят відсотків, рівня димності - на п’ятдесят–сімдесят відсотків, а також у зниженні навантаження на DPF та скороченні витрат на реагент системи SCR. Покращення процесу згоряння сприяє зменшенню середніх викидів CO₂ під час вибігу завдяки зниженню витрати палива в режимах руху з малим навантаженням.

Економічна оцінка заходів ґрунтується на порівнянні вартості регламентного обслуговування систем двигуна з економією палива та ресурсними витратами агрегатів після застосування відновлювальних робіт. Падіння тиску впорскування та погіршення процесів сумішоутворення збільшують витрату дизельного палива приблизно на 0,3–0,6 л/100 км у реальних умовах експлуатації. У перерахунку на річний пробіг 20–25 тисяч кілометрів це означає додаткову витрату 60–150 літрів палива, що еквівалентно суттєвим фінансовим втратам протягом експлуатації. Ремонт або чистка форсунок, відновлення характеристик паливного насоса високого тиску та регенерація інтеркулера окуповуються протягом одного–двох сезонів експлуатації лише за рахунок економії палива. Окрему економічну перевагу має відновлення роботи системи EGR, яке зменшує температурні піки згоряння, продовжує ресурс клапанного механізму та стабілізує навантаження на систему нейтралізації.

У випадку значного зносу економічні втрати зростають не тільки через збільшення витрати палива, а й через підвищену частоту регенерацій фільтра твердих частинок. Часті активні регенерації збільшують споживання палива та прискорюють старіння окисного каталізатора й каналу DPF. Відновлення компресії, заміна зношених розпилювачів і відновлення герметичності системи наддуву повертають роботу двигуна до умов, за яких DPF працює з мінімально можливою кількістю регенерацій, що безпосередньо впливає на його ресурс і запобігає дороговартісним ремонтам.

З екологічної точки зору ефективність заходів полягає у здатності зменшити інтегральні викиди CO₂ шляхом зниження витрати палива,

скоротити викиди токсичних компонентів та знизити кількість твердих частинок, які є найнебезпечнішими з точки зору впливу на здоров'я людини. З економічної точки зору основні переваги полягають у зменшенні витрати палива, зниженні навантаження на системи нейтралізації (EGR, DPF, SCR), подовженні ресурсу дороговартісних компонентів та уникненні позапланових ремонтів. Сукупність цих факторів підтверджує, що підтримання оптимального технічного стану дизельного двигуна є одночасно економічно і екологічно доцільним рішенням, здатним забезпечити стабільну і безпечну експлуатацію транспортного засобу протягом тривалого періоду.

Таблиця 6.1 - Розрахунок економічної ефективності відновлювальних заходів

Заходи з відновлення	ΔQ , л/100 км	$S_{річн}$, л	$E_{річн}$, грн	$C_{робіт}$, грн	$T_{окупн.}$, міс
Чистка та калібрування форсунок	0,30	60	3600	3000	10
Відновлення тиску в системі Common Rail (перевірка/ремонт ТНВД)	0,40	80	4800	5500	14
Герметизація впускного тракту + чистка інтеркулера	0,20	40	2400	1500	7,5
Ремонт або заміна пошкодженого датчика MAP/MAF	0,10	20	1200	1600	16
Відновлення компресії (заміна кілець/розпилювачів)	0,50	100	6000	15 000	30
Очищення та адаптація системи EGR	0,15	30	1800	1500	10
Відновлення роботи турбокомпресора (регулювання геометрії)	0,35	70	4200	5000	14
Профілактика системи DPF (пасивна регенерація, очищення каналу)	0,20	40	2400	3500	17,5

Розрахунок окупності показує, що найшвидше себе виправдовують ті заходи, які безпосередньо впливають на щільність повітря, стабільність розпилу та коректність роботи датчиків керування згорянням. Найбільш економічно вигідними є:

- очищення інтеркулера та усунення підсмоктування повітря у впускному трактові (окупність до 8 місяців);
- чистка та калібрування форсунок (до 10 місяців);
- профілактика системи EGR (приблизно 10 місяців).

Більш тривалу окупність мають капітальні заходи - наприклад, відновлення компресії. Однак вони істотно покращують не тільки витрату палива, але й димність, викиди CO, CH та навантаження на DPF, що продовжує загальний ресурс двигуна.

У сукупності заходи дають змогу зменшити річну витрату палива на 150–250 літрів залежно від ступеня зносу, що забезпечує економію 9–15 тисяч гривень на рік та значно покращує екологічні показники автомобіля.

Висновки

1. Проведено розрахунок витрат пов'язаних з експлуатацією автомобіля з різним технічним станом двигуна. Зокрема встановлено, що у сукупності заходи дають змогу зменшити річну витрату палива на 150–250 літрів залежно від ступеня зносу, що забезпечує економію 9–15 тисяч гривень на рік та значно покращує екологічні показники автомобіля.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У результаті дослідження встановлено, що технічний стан автомобільного двигуна є визначальним чинником рівня екологічної безпеки транспортного засобу. На основі експериментальних вимірювань та аналітичного аналізу підтверджено суттєвий вплив параметрів циліндро-поршневої групи, системи упорскування та нейтралізації відпрацьованих газів на концентрацію основних токсичних компонентів - CO, CH, NO_x та твердих частинок (PM).

Погіршення герметичності, зниження тиску упорскування чи відхилення у роботі системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) спричиняють зростання частки оксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів у вихлопі на 20–40 %, а також збільшення димності до 30 %. Для дизельного двигуна Renault K9K у модифікаціях Euro-5/6 встановлено, що сумарна ефективність систем EGR + DOC + DPF + SCR становить понад 90 %, що забезпечує концентрацію NO_x у межах 0,07–0,08 г/км і повну відповідність вимогам стандарту Euro-6.

Отримані результати засвідчують, що дотримання регламентів технічного обслуговування та своєчасна діагностика систем живлення і нейтралізації вихлопу дозволяють зменшити загальні шкідливі викиди на 25–35 % без суттєвого зниження потужності двигуна. Розроблена методика оцінювання токсичності згідно з ISO 8178 та ДСТУ 4276 може бути використана в системах технічного контролю автотранспортних підприємств, а також у процесі сертифікаційних випробувань двигунів.

Практичне значення роботи полягає у розробленні підходів до прогнозування рівня токсичних викидів за параметрами технічного стану двигуна. Це дає змогу оптимізувати графіки обслуговування, зменшити витрати палива на 3–5 %, а також підвищити екологічну надійність транспортного засобу. Рекомендовано впровадження комплексної системи моніторингу токсичності на базі електронних діагностичних модулів та постійного аналізу відхилень від нормативів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bosch automotive electrics and automotive electronics. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. 530 p.
2. H. Wu, et al,” An Experimental Investigation of the Combustion Characteristics of Acetone-Butanol-Ethanol-Diesel Blends with Different ABE Component Ratios in a Constant Volume Chamber”, SAE Technical Paper, 2014.
3. ISO 8178-1:2020. Reciprocating internal combustion engines — Exhaust emission measurement — Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions. – Geneva: ISO, 2020. – 68 p.
4. Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. – Official Journal of the European Union, 2007.
5. Tom Denton. Automobile mechanical and electrical systems. New York, NY : Routledge, 2018. 379 p.
6. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни. Київ: Арістей, 2004. 476 с
7. Безпека життєдіяльності [Текст] : підруч. для студ. с.-г. вузів / І. П. Пістун [та ін.]. – Львів : Світ, 1995. 288 с
8. Білявський Г.О. Основи екології : підручник для студ. вищих навч. закладів / Г. О. Білявський та ін. Київ: Либідь, 2004. 408 с..
9. Боярко І. М. Інвестиційний аналіз: [навч. посіб.] / І. М Боярко,Л. Л. Гриценко. Київ: Центр учбової літератури, 2011. 400 с.
10. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах.Т.5. Екологізація ДВЗ / за ред. проф. А. П. Марченко, проф. А. Ф. Шеховцова. Харків: Прапор, 2004. 360 с.
11. Директива 96/96 ЄС від 20.12.1996 р "Про прийняття єдиних приписів для країн-членів Співтовариства щодо технічного нагляду транспортних засобів і причепів".

12. Директива ЄС № 692/2008 від 18 липня 2008 р. щодо впровадження та оновлення вимог Euro-5 та Euro-6 для легкових транспортних засобів.
13. ДСТУ 4276:2004. Двигуни дорожніх транспортних засобів. Методи визначення димності та токсичності відпрацьованих газів. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с.
14. Електронні автомобільні системи [Електронний ресурс]. Режим доступу : URL : <https://www.denso-am.eu/ua/products/engine-management-systems/lambda-sensors>.
15. Жидецький П.Б. Основи охорони праці. [Текст]: Підручник. Львів : Афіша, 2002. 370 с.
16. Канарчук В.Є., Курніков І.П. Виробничі системи на транспорті. Підручник. Київ: вища шк., 1997. 359 с.
17. Канарчук В.Є., Лудченко О.А., Чигиринець А.Д. Експлуатаційна надійність автомобілів: Підручник у 2 ч., 4 кн. Київ: Вища школа, 2000. Ч. 1: кн. 1. 609 с., кн.2. 458 с.; Ч.2: кн.3. 321 с.; кн. 4. 552 с. .
18. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. Організація і управління. Київ: Знання-Прес, 2004. 478 с.
19. Олег Сукач, Олег Миронюк, Віктор Шевчук. Методичні рекомендації для виконання кваліфікаційної роботи здобувачами першого бакалаврського рівня вищої освіти за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт». Дубляни, 2023. 50 с.
20. Основи економіки транспорту : підручник / Щелкунов В. І., Кулаєв Ю. Ф., Зайончик Л. Г., Загорулько В. М. [та ін.]. Київ: Кондор, 2011. 392 с.
21. Офіційний сайт Європейської комісії. Emission standards (Euro 5/6). URL: <https://climate.ec.europa.eu/> (дата звернення 20.08.2025).
22. Офіційний сайт компанії Renault. URL: <https://www.renaultgroup.com/> (дата звернення 22.09.2025).
23. Офіційний сайт Міністерства довкілля та природних ресурсів України. Технічний регламент колісних транспортних засобів. URL: <https://mepr.gov.ua/> (дата звернення 06.09.2025).

24. Постанова КМУ № 137 від 30.01.2012 «Про затвердження Порядку проведення обов'язкового технічного контролю та обсягів перевірки технічного стану транспортних засобів, технічного опису та зразка протоколу перевірки технічного стану транспортного засобу» (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 485 від 23.09.2014).

25. Приміський В. Стандарти і засоби вимірювання димності відпрацьованих газів дизельних двигунів [Електронний ресурс] В. Приміський. Стандартизація. Сертифікація. Якість. 2014. № 3. С. 17–21.

26. Системи каталітичного відновлення [Електронний ресурс]. <https://kus-usa.com/resources/selective-catalytic-reduction-scr-system-guide/>

27. Ткачук К. Н., Іванчук Д.Ф. та ін. Довідник по охороні праці на промисловому підприємстві. Київ: Техніка, 1991. 192 с.

28. Транспортна екологія: навчальний посібник. О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвєєва, С. Й. Шаманський, Т. І. Дмитруха, С. М. Маджд; за заг. редакцією С. В. Бойченка. Київ: НАУ, 2017. 507 с..

29. Транспортні енергетичні установки (традиційні, нетрадиційні та альтернативні), принцип роботи та особливості будови : навч. посіб. Ю. Ф. Гутаревич та ін. Київ: НТУ, 2015. 244 с.