

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування факультету)

Кафедра екології

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**Порівняльний аналіз викидів парникових газів
протягом життєвого циклу автомобілів з ДВЗ,
гібридних та електричних транспортних засобів**

спеціальність

101 Екологія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма

«Екологія»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕОС - 41

Хапко Юрій Володимирович

(підпис)

Керівник:

к.геогр.н., доцент

Панькевич Сергій Григорович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

к.геогр.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Федонюк Віталіна Володимирівна

(підпис)

Луцьк – 2026 рік

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аграрних технологій та екології

Кафедра екології

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 101 Екологія

Освітня програма: «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 202__ р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Хапко Юрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

Порівняльний аналіз викидів парникових газів протягом життєвого циклу автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів

Керівник роботи: Панькевич Сергій Григорович, к. геогр. н., доцент

затверджені наказом закладу вищої освіти від «28» лютого 2026 р.

№ 102/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «__» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): доповідні записки та супровідні аналітичні матеріали по будові та роботі ДВЗ та електродвигунів, літературні джерела, статистична та довідкова література з основ виробництва та експлуатації бензинових двигунів та електродвигунів, державні стандарти в галузі, наукові звіти, картографічні матеріали.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1) ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ТРАНСПОРТНОМУ СЕКТОРІ, 2) МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ, 3) ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ З ДВЗ, ГІБРИДНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 4) висновки,

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1) Мета та завдання кваліфікаційної роботи, 2) Об'єкт кваліфікаційної роботи, 3) Основні джерела викидів CO₂ в містах., 4) Основні технічні характеристики досліджуваних автомобілів, 5) Порівняння типів силових установок автомобілів; 6) Джерела утворення парникових газів за стадіями життєвого циклу

транспортних засобів ;7) Структура життєвого циклу транспортного засобу 8).
Розрахункові показники питомих викидів CO₂-еквіваленту ;9) Порівняння
викидів парникових газів на окремих стадіях життєвого циклу транспортних
засобів 10) висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>розділ</i>			
<i>розділ</i>			
<i>Висновки</i>			

7. Дата видачі завдання « » 202 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Обґрунтування теми</i>	<i>Вересень - Жовтень 2025</i>	<i>виконано</i>
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>Жовтень – Листопад 2025</i>	<i>виконано</i>
3.	<i>розділ</i>	<i>Листопад Грудень 2025</i>	<i>виконано</i>
4.	<i>розділ</i>	<i>Січень – Березень 2026</i>	<i>виконано</i>
5.	<i>Висновки та пропозиції</i>	<i>Березень 2026</i>	<i>виконано</i>
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>Квітень 2026</i>	<i>виконано</i>
7.	<i>Формування додатків</i>	<i>Травень 2026</i>	<i>виконано</i>
8.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>Травень 2026</i>	<i>виконано</i>
9.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>Травень 2026</i>	<i>виконано</i>
10.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>До 01.06.2026</i>	<i>виконано</i>
11.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	<i>13.06.2026</i>	<i>виконано</i>

Здобувач вищої освіти _____ (__Хапко Ю.В. __)
 (підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ (__Панькевич С. Г. __)
 (підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Хапко Ю.В. Порівняльний аналіз викидів парникових газів протягом життєвого циклу автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Екологія» спеціальності 101 Екологія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 3 розділів, вступу, висновків, переліку посилань.

Об'єктом дослідження є процеси утворення викидів парникових газів протягом життєвого циклу автомобілів різних типів.

Методи дослідження – до основних методів дослідження можна віднести комплекс кількісних та якісних методів, що дозволяють всебічно оцінити екологічні, енергетичні та соціальні наслідки використання автомобілів різних видів.

Результати виконання кваліфікаційної роботи бакалавра: ідентифіковано основні типи двигунів, визначено безпечний рівень їх використання, оцінено рівень ризику для здоров'я та їх вплив на екосистеми. Це допомагає встановити можливі наслідки використання їх на екосистеми та допомагає уникнути негативних впливів в результаті розробки та впровадження екологічно-орієнтованих практик.

Ключові слова: електродвигун, екологічна оцінка, викиди CO₂, шкідливі речовини, витрати пального, паливна ефективність, відновлювана енергія, вуглецевий слід, екологічна безпека, зниження викидів.

ANNOTATION

Khapko Y.V. Comparative analysis of greenhouse gas emissions during the life cycle of cars with internal combustion engines, hybrid and electric vehicles. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Ecology" specialty 101 Ecology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Bachelor's qualification work consists of 3 sections, introduction, conclusions, list of references.

The object of the study is the processes of greenhouse gas emissions formation during the life cycle of cars of different types.

Research methods - the main research methods include a set of quantitative and qualitative methods that allow comprehensively assessing the environmental, energy and social consequences of using cars of various types.

Results of the bachelor's qualification work: the main types of engines are identified, the safe level of their use is determined, the level of health risk and their impact on ecosystems is assessed. This helps to establish the possible consequences of their use on ecosystems and helps to avoid negative impacts as a result of the development and implementation of environmentally friendly practices.

Keywords: hybrid engine, environmental assessment, CO₂ emissions, harmful substances, fuel consumption, fuel efficiency, renewable energy, carbon footprint, environmental safety, emission reduction

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ТРАНСПОРТНОМУ СЕКТОРІ.....	9
1.1. Роль автомобільного транспорту у формуванні викидів парникових газів та зміні клімату.....	9
1.2. Характеристика автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, гібридних та електричних транспортних засобів.....	12
1.3. Концепція життєвого циклу транспортних засобів та методологія оцінки життєвого циклу (LCA).....	17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ..	20
2.1. Джерела утворення парникових газів на стадіях життєвого циклу транспортних засобів.....	20
2.2. Методика розрахунку та оцінювання викидів CO ₂ -еквіваленту для автомобілів різних типів.....	23
2.3. Вибір об'єктів дослідження та їх техніко-екологічна характеристика.	28
РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ З ДВЗ, ГІБРИДНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	31
3.1. Оцінка викидів парникових газів на стадіях виробництва, експлуатації та утилізації транспортних засобів.....	31
3.2. Порівняльний аналіз сумарних викидів CO ₂ -еквіваленту автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів.....	34
3.3. Перспективи зниження викидів парникових газів у транспортному секторі та рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності автомобільного транспорту.....	36
ВИСНОВКИ	40
Перелік посилань	42

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний транспортний сектор є одним із найбільших джерел викидів парникових газів, які спричиняють глобальні кліматичні зміни та негативно впливають на стан довкілля. Основна частка викидів припадає на автомобільний транспорт, що використовує двигуни внутрішнього згоряння. Водночас стрімкий розвиток гібридних та електричних транспортних засобів розглядається як один із перспективних напрямів декарбонізації транспортної галузі. Проте екологічна ефективність різних типів автомобілів повинна оцінюватися не лише за викидами під час експлуатації, а й з урахуванням усіх стадій їх життєвого циклу, включаючи виробництво, використання, технічне обслуговування та утилізацію. Тому проведення порівняльного аналізу викидів парникових газів протягом життєвого циклу автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, гібридних та електричних транспортних засобів є актуальним науковим і практичним завданням.

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є проведення порівняльного аналізу викидів парникових газів протягом життєвого циклу автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, гібридних та електричних транспортних засобів та визначення їх екологічної ефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати роль транспортного сектору у формуванні викидів парникових газів та вплив автомобільного транспорту на зміну клімату;
- дослідити особливості конструкції та експлуатації автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів;
- розглянути концепцію оцінки життєвого циклу та методичні підходи до визначення викидів парникових газів;
- визначити основні джерела утворення парникових газів на різних стадіях життєвого циклу транспортних засобів;
- провести оцінку викидів CO₂-еквіваленту для досліджуваних типів автомобілів;

-здійснити порівняльний аналіз екологічних показників автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів;

-обґрунтувати напрями зниження викидів парникових газів у транспортному секторі.

Об'єктом дослідження є процеси утворення викидів парникових газів протягом життєвого циклу автомобілів різних типів.

Предметом дослідження є екологічні показники та особливості формування викидів парникових газів на стадіях виробництва, експлуатації та утилізації автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, гібридних та електричних транспортних засобів.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу та узагальнення наукової літератури, порівняльний аналіз, метод оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), статистичні та розрахункові методи, а також графічні методи представлення результатів досліджень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання отриманих результатів для оцінки екологічної ефективності різних типів транспортних засобів, розроблення заходів щодо скорочення викидів парникових газів та обґрунтування перспектив розвитку екологічно безпечного транспорту.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі розглянуто теоретичні основи оцінки викидів парникових газів у транспортному секторі. Другий розділ присвячений методичним підходам до оцінки викидів протягом життєвого циклу транспортних засобів. У третьому розділі виконано порівняльний аналіз викидів парникових газів автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів та визначено перспективи зниження екологічного навантаження від автомобільного транспорту.

Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНКИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У ТРАНСПОРТНОМУ СЕКТОРІ

1.1. Роль автомобільного транспорту у формуванні викидів парникових газів та зміні клімату

«Сучасний розвиток світової економіки та урбанізація супроводжуються стрімким зростанням кількості транспортних засобів, що, у свою чергу, призводить до збільшення споживання енергетичних ресурсів та підвищення антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище. Автомобільний транспорт є однією з найважливіших складових транспортної системи, забезпечуючи мобільність населення, функціонування промисловості та розвиток міжнародної торгівлі. Водночас саме транспортний сектор є одним із найбільших джерел викидів парникових газів, що сприяють глобальній зміні клімату» [10].

За даними Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (ІРСС), транспортний сектор формує близько 15–25 % глобальних антропогенних викидів парникових газів, причому найбільша частка припадає саме на автомобільний транспорт. Основним джерелом викидів є процес спалювання викопного палива – бензину та дизельного палива – у двигунах внутрішнього згоряння. У результаті хімічних реакцій окиснення вуглеводнів в атмосферу потрапляє значна кількість діоксиду вуглецю (CO_2), а також метану (CH_4), оксиду азоту (N_2O) та інших газів, які мають виражений парниковий ефект.

«Парникові гази здатні поглинати теплове випромінювання земної поверхні та затримувати його в атмосфері, що призводить до підвищення середньої температури повітря та зміни кліматичних умов. Наслідками глобального потепління є збільшення частоти екстремальних погодних явищ, танення льодовиків, підвищення рівня Світового океану, зміна режиму опадів, деградація екосистем та погіршення умов життєдіяльності населення» [9].

Серед парникових газів найбільший внесок у зміну клімату здійснює діоксид вуглецю, частка якого становить понад 75 % усіх антропогенних викидів. Джерелом його утворення в транспортному секторі є передусім спалювання

нафтопродуктів. Викиди CO₂ прямо залежать від кількості спожитого палива та ефективності роботи двигуна. Так, середній легковий автомобіль з бензиновим двигуном під час руху виділяє від 120 до 180 г CO₂ на 1 км пробігу, а за річного пробігу 15–20 тис. км може утворювати понад 2–3 т CO₂.

«Окрім діоксиду вуглецю, у процесі роботи двигунів внутрішнього згоряння утворюються інші речовини, що негативно впливають на довкілля та здоров'я людини. До них належать оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO), вуглеводні (CH), тверді частинки (PM), а також вторинні забруднювачі, які сприяють утворенню фотохімічного смогу. Особливо гостро проблема забруднення атмосферного повітря проявляється у великих містах, де висока концентрація транспортних потоків призводить до накопичення шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери» [12].

Зростання автомобілізації населення супроводжується постійним збільшенням кількості транспортних засобів. За оцінками міжнародних організацій, світовий автопарк перевищує 1,5 млрд одиниць, а до середини XXI століття цей показник може зрости майже вдвічі. Така тенденція призводить до подальшого збільшення споживання енергії та викидів парникових газів, що ускладнює виконання міжнародних кліматичних угод та досягнення цілей сталого розвитку.

У відповідь на зростання кліматичних загроз міжнародною спільнотою було розроблено низку нормативно-правових документів, спрямованих на скорочення викидів парникових газів. Серед них важливе значення мають Рамкова конвенція ООН про зміну клімату, Кіотський протокол, Паризька кліматична угода, а також Європейський зелений курс (European Green Deal), який передбачає досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Одним із ключових напрямів реалізації цих стратегій є декарбонізація транспортного сектору.

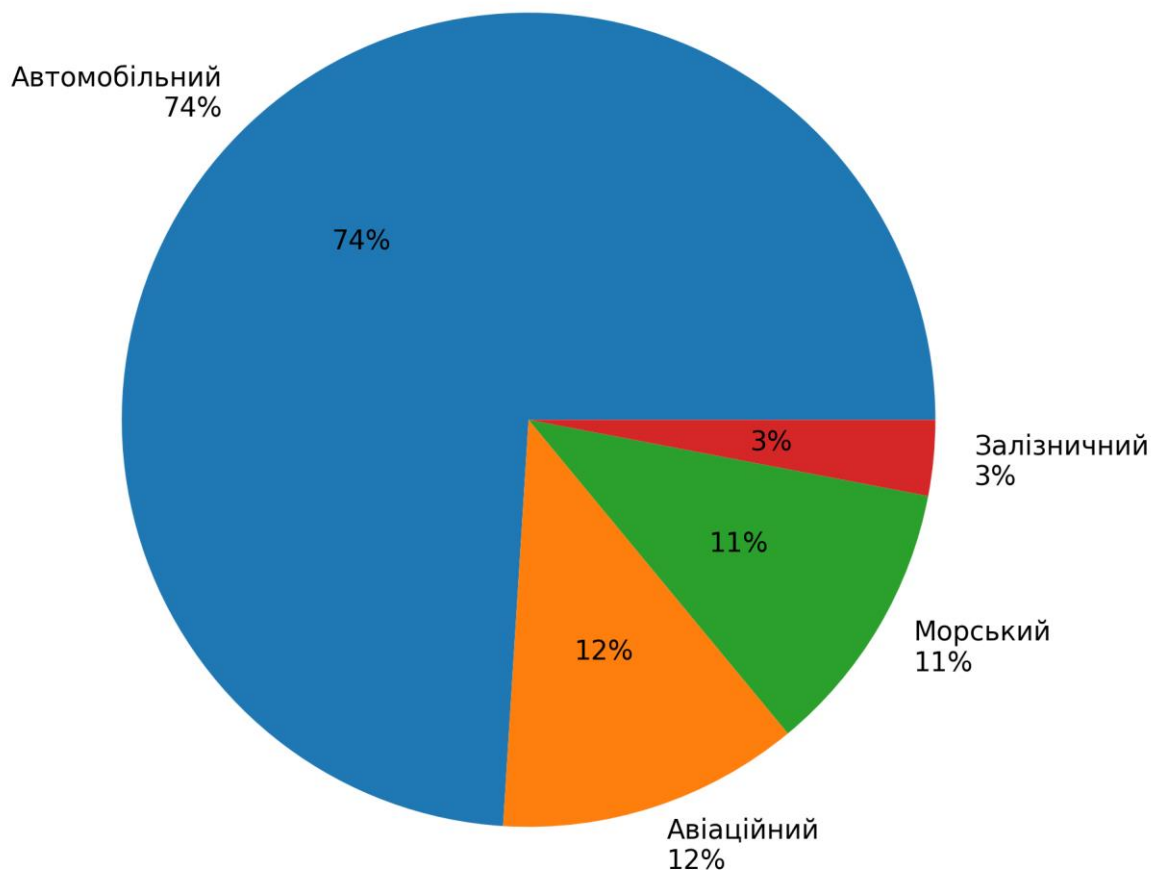


Рисунок 1.1 – Частка видів транспорту у викидах парникових газів транспортного сектору.

У транспортній галузі скорочення викидів парникових може бути досягнуто завдяки підвищенню паливної ефективності автомобілів, впровадженню гібридних технологій, збільшенню частки електромобілів, використанню відновлюваних джерел енергії та розвитку екологічно безпечної транспортної інфраструктури. У сучасних умовах саме електрифікація транспорту розглядається як один із найперспективніших шляхів зменшення негативного впливу автомобільного транспорту на кліматичну систему планети.

Таким чином, автомобільний транспорт є одним із ключових факторів формування антропогенних викидів парникових газів та зміни клімату. Значна частка викидів пов'язана з використанням традиційних двигунів внутрішнього згоряння, що зумовлює необхідність переходу до більш енергоефективних та

екологічно безпечних транспортних засобів. Тому оцінка викидів парникових газів та пошук шляхів їх зниження є важливим напрямом сучасних екологічних досліджень та одним із пріоритетних завдань у сфері сталого розвитку.

1.2. Характеристика автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, гібридних та електричних транспортних засобів

«Сучасний розвиток автомобільної промисловості спрямований на підвищення енергоефективності транспортних засобів, зменшення споживання викопних палив та скорочення викидів парникових газів. Залежно від типу силової установки сучасні легкові автомобілі можна поділити на транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння, гібридні автомобілі та електричні транспортні засоби. Кожен із цих типів має свої конструктивні особливості, принцип роботи, переваги та недоліки, які визначають рівень їх екологічної ефективності» [8].

Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння

Автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) є найбільш поширеним видом транспортних засобів у світі. Їх робота базується на перетворенні хімічної енергії палива в механічну енергію внаслідок процесу згоряння паливно-повітряної суміші у циліндрах двигуна. Основними видами палива є бензин та дизельне паливо.

До складу силової установки автомобіля з ДВЗ входять двигун, паливна система, система запалювання, система охолодження, система випуску відпрацьованих газів та трансмісія. Під час експлуатації таких автомобілів відбувається утворення діоксиду вуглецю, оксидів азоту, чадного газу та твердих частинок, які негативно впливають на навколишнє середовище.

Як приклад автомобіля з традиційною силовою установкою у роботі розглядається Toyota Corolla 1.8 бензин, середня витрата пального якої становить близько 6,5 л/100 км, а питомі викиди CO₂ – близько 149 г/км.

Основними перевагами автомобілів з ДВЗ є:

- розвинена інфраструктура заправних станцій;
- великий запас ходу;
- відносно невисока вартість придбання;
- швидке поповнення запасу палива.

До недоліків належать:

- значні викиди парникових газів;
- низький коефіцієнт корисної дії (25–35 %);
- залежність від викопного палива;
- високий рівень шуму та вібрацій.

Гібридні транспортні засоби

Гібридні автомобілі поєднують двигун внутрішнього згоряння та електричний двигун, які можуть працювати окремо або одночасно. Основною метою використання гібридних технологій є підвищення паливної економічності та зменшення шкідливих викидів.

У гібридних транспортних засобах електрична енергія накопичується в акумуляторній батареї, яка заряджається під час рекуперативного гальмування або роботи двигуна внутрішнього згоряння. Завдяки цьому досягається зниження витрат пального та підвищення загального ККД силової установки.

Представником гібридних автомобілів у дослідженні є Toyota Prius Hybrid. Автомобіль оснащений бензиновим двигуном об'ємом 1,8 л та електродвигуном, що дозволяє знизити витрати пального до 4,3 л/100 км, а викиди CO₂ – до 98 г/км.

Основними перевагами гібридних автомобілів є:

- менша витрата пального;
- скорочення викидів CO₂ на 20–40 %;
- високий запас ходу;
- рекуперація енергії під час гальмування;
- відсутність необхідності в зарядній інфраструктурі.

Недоліками гібридних автомобілів є:

- складніша конструкція;
- вища вартість порівняно з автомобілями з ДВЗ;

- наявність викидів під час роботи двигуна внутрішнього згорання;
- обмежений ресурс акумуляторної батареї.

Електричні транспортні засоби

Електромобілі є одним із найперспективніших напрямів розвитку автомобільного транспорту. Вони використовують електродвигун, який отримує енергію від тягової акумуляторної батареї. На відміну від автомобілів з ДВЗ, електромобілі не мають системи згорання палива, тому під час експлуатації не утворюють прямих викидів забруднювальних речовин та діоксиду вуглецю.

У роботі як приклад електричного транспортного засобу розглядається Nissan Leaf, оснащений електродвигуном потужністю 110 кВт та літій-іонною батареєю ємністю 40 кВт·год. Середнє споживання електроенергії становить близько 17 кВт·год на 100 км, а запас ходу – близько 270 км.

Перевагами електромобілів є:

- відсутність прямих викидів CO₂ під час руху;
- високий коефіцієнт корисної дії (85–95 %);
- низький рівень шуму;
- менші витрати на технічне обслуговування;
- можливість використання електроенергії з відновлюваних джерел.

Основними недоліками є:

- висока вартість акумуляторних батарей;
- тривалий час заряджання;
- обмежений запас ходу;
- залежність екологічних показників від структури виробництва електроенергії;
- значні енергетичні витрати на виробництво акумуляторів.

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики досліджуваних автомобілів

Показник	Toyota Corolla 1.8 бензин	Toyota Prius Hybrid	Nissan Leaf
Тип силової установки	Бензиновий ДВЗ	Гібридна (бензиновий двигун + електромотор)	Електродвигун
Робочий об'єм двигуна, л	1,8	1,8	–
Потужність, кВт	103	90 (ДВЗ) + 53 (електромотор)	110
Сумарна потужність системи, кВт	103	90	110
Тип палива	Бензин	Бензин + електроенергія	Електроенергія
Ємність акумуляторної батареї	12 В	1,3 кВт·год	40 кВт·год
Середня витрата пального, л/100 км	6,5	4,3	–
Споживання електроенергії, кВт·год/100 км	–	–	17,0
Викиди CO ₂ під час експлуатації, г/км	149	98	0*
Запас ходу, км	≈800	≈950	≈270
Споряджена маса, кг	1320	1375	1580
Кількість місць	5	5	5
Рік моделі	2022	2022	2022

Встановлено, що гібридний автомобіль характеризується нижчою витратою пального та меншими викидами CO₂ порівняно з бензиновим аналогом, тоді як електромобіль Nissan Leaf не створює прямих викидів парникових газів під час експлуатації, що зумовлює його вищу екологічну ефективність у процесі використання.

Таким чином, автомобілі з двигунами внутрішнього згорання, гібридні та електричні транспортні засоби відрізняються конструктивними особливостями, принципом роботи та екологічними характеристиками. Автомобілі з ДВЗ характеризуються найбільшими викидами парникових газів, гібридні транспортні засоби забезпечують проміжний рівень екологічної ефективності, а

електромобілі мають найменший негативний вплив на довкілля під час експлуатації. Саме тому подальший розвиток транспортної галузі пов'язаний із впровадженням гібридних та електричних технологій, які сприяють зниженню вуглецевого сліду та досягненню цілей декарбонізації.

Таблиця 1.2 – Порівняння типів силових установок автомобілів

Характеристика	Двигун внутрішнього згоряння (Toyota Corolla 1.8)	Гібридна силова установка (Toyota Prius Hybrid)	Електрична силова установка (Nissan Leaf)
Джерело енергії	Бензин	Бензин та електроенергія	Електроенергія
Основні компоненти	ДВЗ, паливна система, трансмісія	ДВЗ, електродвигун, інвертор, акумулятор	Електродвигун, тягова батарея, інвертор
Принцип роботи	Перетворення енергії згоряння палива в механічну	Комбіноване використання ДВЗ та електродвигуна	Перетворення електричної енергії в механічну
ККД силової установки, %	25–35	35–45	85–95
Середня витрата енергії	6,5 л/100 км	4,3 л/100 км	17 кВт·год/100 км
Викиди CO ₂ під час експлуатації, г/км	149	98	0*
Рівень шуму	Високий	Середній	Низький
Запас ходу	Високий	Високий	Обмежений ємністю батареї
Час поповнення запасу енергії	3–5 хв	3–5 хв	0,5–8 год
Вартість експлуатації	Висока	Середня	Низька
Екологічний вплив під час експлуатації	Високий	Помірний	Мінімальний
Складність конструкції	Середня	Висока	Середня

Аналіз показує, що двигуни внутрішнього згоряння характеризуються найбільшими викидами парникових газів та нижчим коефіцієнтом корисної дії. Гібридні силові установки забезпечують зниження витрат пального та викидів CO₂ завдяки поєднанню бензинового двигуна та електромотора. Найвищий ККД та відсутність прямих викидів під час експлуатації властиві електричним

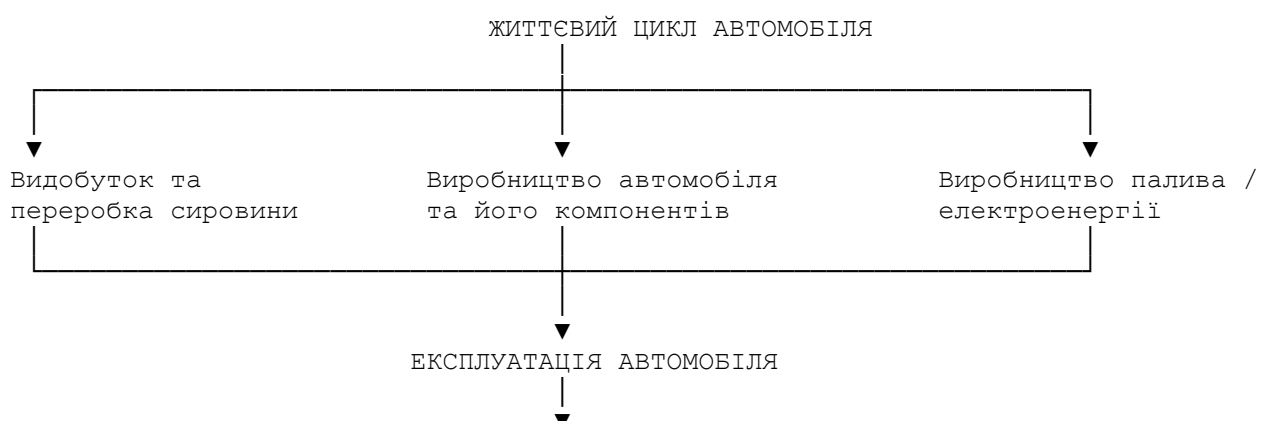
транспортним засобам, що робить їх найбільш екологічно ефективними серед розглянутих типів автомобілів

1.3. Концепція життєвого циклу транспортних засобів та методологія оцінки життєвого циклу (LCA)

Одним із сучасних підходів до комплексної оцінки впливу продукції та технологій на навколишнє природне середовище є концепція життєвого циклу (Life Cycle Thinking), яка ґрунтується на врахуванні всіх стадій існування об'єкта – від видобутку сировини до його утилізації або повторного використання. Для транспортних засобів такий підхід є особливо актуальним, оскільки екологічне навантаження формується не лише під час експлуатації автомобіля, але й на етапах виробництва матеріалів, виготовлення компонентів, технічного обслуговування та переробки після завершення терміну служби.

Концепція життєвого циклу отримала широке поширення завдяки розвитку міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044, які регламентують проведення оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA). Методологія LCA дозволяє кількісно оцінити споживання ресурсів, використання енергії, утворення відходів та величину викидів забруднювальних речовин і парникових газів на всіх стадіях функціонування продукції.

Для транспортних засобів життєвий цикл охоплює послідовність взаємопов'язаних процесів, що починаються з видобутку та переробки природних ресурсів і завершуються утилізацією або повторним використанням матеріалів. Кожна стадія супроводжується певним рівнем енергоспоживання та утворенням викидів CO₂-еквіваленту.



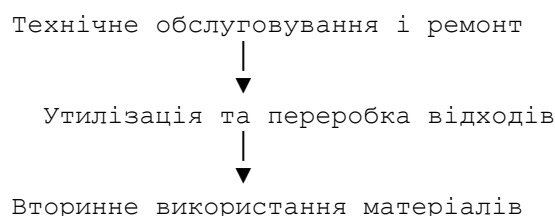


Рисунок 1.2 – Структура життєвого циклу транспортного засобу

Першою стадією життєвого циклу є видобуток та переробка сировини. На цьому етапі здійснюється видобуток залізної руди, алюмінію, міді, літію, кобальту, нафти та інших ресурсів, необхідних для виробництва транспортних засобів. Ця стадія характеризується значним споживанням енергії та утворенням викидів парникових газів.

Наступний етап охоплює виробництво автомобіля та його складових. Він включає виготовлення кузова, двигуна внутрішнього згоряння або електродвигуна, трансмісії, акумуляторних батарей та інших вузлів. Для електромобілів особливе значення має виробництво літій-іонних батарей, яке є одним із найбільш енергоємних процесів.

Третя стадія пов'язана з виробництвом енергоносіїв. Для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння це видобуток, транспортування та переробка нафти, а для електромобілів – виробництво та передача електроенергії.

Найбільш тривалою стадією є експлуатація транспортного засобу. Саме на цьому етапі автомобілі з ДВЗ створюють найбільшу частку сумарних викидів CO₂, тоді як для електромобілів прямі викиди під час руху відсутні.

Після завершення основного періоду експлуатації автомобіль проходить стадії технічного обслуговування, ремонту, демонтажу, утилізації та переробки. Повторне використання металів, пластмас та інших матеріалів дозволяє зменшити споживання первинної сировини та скоротити загальне екологічне навантаження.

Методологія оцінки життєвого циклу (LCA) складається з чотирьох основних етапів відповідно до міжнародних стандартів ISO 14040 та ISO 14044:

1. Визначення мети та меж дослідження (Goal and Scope Definition).
На цьому етапі встановлюються мета дослідження, функціональна одиниця та межі системи.
2. Інвентаризаційний аналіз життєвого циклу (Life Cycle Inventory, LCI).
Проводиться збір даних щодо споживання сировини, енергії, води, а також кількості викидів та відходів.
3. Оцінка впливу життєвого циклу (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).
Визначаються показники екологічного впливу, зокрема потенціал глобального потепління (Global Warming Potential, GWP), який виражається у CO₂-еквіваленті.
4. Інтерпретація результатів (Interpretation). Здійснюється аналіз отриманих даних та формулюються висновки щодо екологічної ефективності досліджуваного об'єкта.

Застосування методології LCA дозволяє об'єктивно оцінювати екологічні переваги та недоліки автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, гібридних та електричних транспортних засобів, а також визначати найбільш ефективні шляхи скорочення викидів парникових газів. Саме тому оцінка життєвого циклу є одним із найбільш поширених інструментів екологічного аналізу в сучасній автомобільній промисловості та використовується при розробленні стратегій декарбонізації транспортного сектору.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ

2.1. Джерела утворення парникових газів на стадіях життєвого циклу транспортних засобів

«Автомобільний транспорт є одним із основних джерел антропогенних викидів парникових газів, які формуються протягом усього життєвого циклу транспортного засобу. На відміну від традиційного підходу, який враховує лише викиди під час експлуатації автомобіля, методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) дозволяє врахувати екологічне навантаження на всіх стадіях існування транспортного засобу – від видобутку сировини до утилізації та повторного використання матеріалів.

Основними парниковими газами, які утворюються на різних етапах життєвого циклу автомобілів, є діоксид вуглецю (CO_2), метан (CH_4) та оксид азоту (N_2O). Для комплексної оцінки їх впливу використовують показник CO_2 -еквіваленту, який враховує потенціал глобального потепління кожного газу» [11].

Видобуток та переробка сировини

Першою стадією життєвого циклу є видобуток і переробка природних ресурсів, необхідних для виробництва транспортних засобів. До основних матеріалів належать сталь, алюміній, мідь, пластмаси, літій, нікель, кобальт та рідкоземельні елементи. Процеси видобутку та збагачення руд характеризуються значними витратами енергії та супроводжуються викидами CO_2 , які утворюються внаслідок використання викопного палива та роботи промислового обладнання.

Для електромобілів особливе значення має видобуток літію, нікелю та кобальту, що використовуються для виробництва тягових акумуляторних батарей. Внаслідок цього екологічне навантаження на початкових стадіях життєвого циклу електричних транспортних засобів є вищим порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння.

Виробництво транспортного засобу

Стадія виробництва автомобіля охоплює виготовлення кузова, двигуна, трансмісії, електронних систем, акумуляторних батарей та складання готового транспортного засобу. У процесі металургійного виробництва, механічної обробки та зварювання використовується значна кількість електроенергії та теплової енергії, що супроводжується утворенням викидів CO₂.

Для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння основне навантаження пов'язане з виготовленням двигуна та трансмісії. Для гібридних автомобілів додається виробництво електродвигуна та акумуляторної батареї. Найбільш енергоємним є виробництво електромобілів, оскільки виготовлення літій-іонних акумуляторів потребує значних витрат матеріалів та енергії.

Виробництво та транспортування енергоносіїв

На даній стадії формуються так звані непрямі викиди парникових газів. Для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння та гібридних транспортних засобів вони пов'язані з видобутком нафти, транспортуванням, переробкою та виробництвом бензину або дизельного палива.

Для електромобілів непрямі викиди залежать від способу виробництва електроенергії. Якщо електроенергія виробляється на теплових електростанціях, які працюють на вугіллі або природному газі, сумарний вуглецевий слід електромобіля збільшується. Використання відновлюваних джерел енергії дозволяє значно скоротити непрямі викиди CO₂.

Експлуатація транспортного засобу

Експлуатаційна стадія є найдовшою та найбільш значущою з точки зору утворення парникових газів. Для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння основним джерелом викидів є спалювання бензину або дизельного палива. У процесі згоряння утворюються CO₂, CH₄ та N₂O, які безпосередньо надходять в атмосферу.

Гібридні автомобілі характеризуються меншими викидами завдяки частковому використанню електродвигуна та системи рекуперації енергії. Для

електромобілів прямі викиди під час руху відсутні, однак непрямі викиди пов'язані з виробництвом електроенергії для заряджання акумуляторної батареї.

Технічне обслуговування та ремонт

У процесі експлуатації автомобіля здійснюється заміна мастильних матеріалів, шин, фільтрів, акумуляторів та інших деталей. Виробництво запасних частин, їх транспортування та утилізація також супроводжуються утворенням парникових газів.

Для електромобілів витрати на технічне обслуговування зазвичай нижчі, оскільки вони мають меншу кількість рухомих деталей та не потребують регулярної заміни моторної оливи.

Утилізація та переробка

Завершальною стадією життєвого циклу транспортного засобу є його демонтаж, утилізація та переробка матеріалів. На цьому етапі відбувається сортування металів, пластмас, скла та інших компонентів. Частина матеріалів може бути повторно використана у виробництві нових виробів, що дозволяє зменшити потребу у первинній сировині.

Особливої уваги потребує переробка акумуляторних батарей гібридних та електричних транспортних засобів, оскільки вони містять цінні та потенційно небезпечні компоненти. Ефективна переробка батарей дозволяє скоротити загальний екологічний вплив та сприяє розвитку циркулярної економіки.

Для узагальнення джерел утворення парникових газів на різних стадіях життєвого циклу транспортних засобів доцільно використовувати таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Джерела утворення парникових газів за стадіями життєвого циклу транспортних засобів

Стадія життєвого циклу	Основні процеси	Основні парникові гази	Основні джерела викидів
Видобуток і переробка сировини	Видобуток руд, нафти, природного газу, виробництво сталі, алюмінію, пластмас	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Спалювання палива, технологічні процеси, транспортні операції

Стадія життєвого циклу	Основні процеси	Основні парникові гази	Основні джерела викидів
Виробництво автомобіля	Виготовлення кузова, двигуна, електродвигуна, акумуляторів, складання автомобіля	CO ₂ , N ₂ O	Енергоспоживання підприємств, металургійне виробництво, виробництво батарей
Виробництво та транспортування енергоносіїв	Переробка нафти, виробництво бензину, генерація електроенергії, транспортування палива	CO ₂ , CH ₄	Нафтопереробні заводи, електростанції, транспортна інфраструктура
Експлуатація автомобіля	Спалювання пального, споживання електроенергії, технічне обслуговування	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Вихлопні гази ДВЗ, виробництво електроенергії для заряджання електромобілів
Технічне обслуговування та ремонт	Заміна деталей, мастил, акумуляторів, шин	CO ₂	Виробництво запасних частин, логістичні операції
Утилізація та переробка	Демонтаж автомобіля, переробка металів, пластмас, акумуляторних батарей	CO ₂ , CH ₄	Енергоспоживання переробних підприємств, спалювання відходів
Вторинне використання матеріалів	Повторне використання металів, пластику та інших матеріалів	CO ₂	Процеси переплавлення та переробки вторинної сировини

Таким чином, викиди парникових газів формуються на всіх стадіях життєвого циклу транспортних засобів. Для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння найбільший внесок у сумарний вуглецевий слід припадає на експлуатацію, тоді як для електромобілів значна частка екологічного навантаження формується на стадіях виробництва акумуляторних батарей та генерації електроенергії. Саме тому об'єктивна оцінка екологічної ефективності транспортних засобів повинна здійснюватися з урахуванням усіх етапів їх життєвого циклу.

2.2. Методика розрахунку та оцінювання викидів CO₂-еквіваленту для автомобілів різних типів

Оцінювання викидів парникових газів є одним із найважливіших інструментів визначення екологічної ефективності транспортних засобів.

Традиційно екологічний вплив автомобілів оцінювався лише за обсягами викидів, які утворюються під час експлуатації. Проте такий підхід не дає повної картини впливу транспортного засобу на довкілля, оскільки значна частина парникових газів утворюється ще на стадіях видобутку сировини, виробництва автомобіля, виготовлення палива або електроенергії, технічного обслуговування та утилізації. Саме тому для комплексної оцінки використовується методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), яка дозволяє враховувати сумарний вуглецевий слід транспортного засобу.

Основні принципи оцінки викидів парникових газів

Методика розрахунку ґрунтується на визначенні сумарної кількості парникових газів, що утворюються протягом усього життєвого циклу автомобіля, та їх приведенні до єдиного показника – CO₂-еквіваленту. Такий підхід дозволяє враховувати не тільки діоксид вуглецю, але й інші парникові гази, зокрема метан та оксид азоту, які мають значно більший потенціал глобального потепління.

Показник CO₂-еквіваленту є універсальною характеристикою екологічного впливу та використовується міжнародними організаціями, зокрема Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (IPCC), Міжнародним енергетичним агентством (IEA), Європейською комісією та Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA).

Межі системи дослідження

При проведенні оцінки життєвого циклу важливим етапом є встановлення меж системи. У дослідженні автомобілів межі системи охоплюють усі процеси, які відбуваються від видобутку природних ресурсів до утилізації транспортного засобу. Такий підхід часто називають «від колиски до могили» (Cradle-to-Grave).

До меж дослідження включаються:

- видобуток та переробка сировини;
- виробництво матеріалів;
- виготовлення автомобіля та його компонентів;
- виробництво палива або електроенергії;

- експлуатація транспортного засобу;
- технічне обслуговування та ремонт;
- демонтаж, утилізація та переробка матеріалів.

У деяких дослідженнях застосовується концепція «від колиски до колиски» (Cradle-to-Cradle), яка додатково враховує повторне використання матеріалів після завершення терміну служби автомобіля.

Визначення функціональної одиниці

Для забезпечення коректного порівняння транспортних засобів використовується функціональна одиниця. Найчастіше нею є один кілометр пробігу або весь життєвий цикл автомобіля за певного пробігу, наприклад 150–200 тис. км.

Використання єдиної функціональної одиниці дозволяє об'єктивно порівнювати автомобілі з різними типами силових установок та різними характеристиками енергоспоживання.

Інвентаризація життєвого циклу

Інвентаризаційний аналіз є одним із ключових етапів методології LCA. На цьому етапі збираються та систематизуються всі дані, що характеризують матеріальні та енергетичні потоки.

До основних показників належать:

- витрати пального або електроенергії;
- маса транспортного засобу;
- матеріальний склад автомобіля;
- енергетичні витрати на виробництво компонентів;
- тривалість експлуатації;
- середній пробіг;
- кількість замінених деталей та витратних матеріалів;
- показники переробки та утилізації.

Джерелами інформації можуть бути технічні характеристики виробників, міжнародні бази даних, наукові публікації, результати випробувань та статистичні матеріали.

Особливості оцінювання автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння.

Для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння найбільшу частку сумарного екологічного навантаження формує експлуатаційний етап. Викиди безпосередньо залежать від витрати пального та пробігу транспортного засобу.

Додатково враховуються:

- видобуток та транспортування нафти;
- виробництво бензину або дизельного палива;
- виготовлення двигуна та трансмісії;
- заміна мастильних матеріалів і запасних частин;
- утилізація автомобіля.

Як правило, частка експлуатаційної стадії для автомобілів з ДВЗ становить понад 60–70 % від загальних викидів протягом життєвого циклу.

Особливості оцінювання гібридних автомобілів

Гібридні транспортні засоби займають проміжне положення між автомобілями з ДВЗ та електромобілями.

Під час їх оцінювання враховуються:

- виробництво бензинового двигуна;
- виготовлення електродвигуна;
- виробництво акумуляторної батареї;
- витрати бензину під час експлуатації;
- робота системи рекуперації енергії;
- заміна окремих компонентів.

Гібридні автомобілі характеризуються меншими викидами під час експлуатації, однак мають дещо вищі викиди на стадії виробництва через складнішу конструкцію.

Особливості оцінювання електромобілів

Для електромобілів характерний принципово інший розподіл викидів протягом життєвого циклу. Прямі викиди під час руху відсутні, проте суттєву роль відіграють:

- виробництво тягової акумуляторної батареї;

- видобуток літію, нікелю та кобальту;
- виробництво електроенергії;
- втрати під час передачі електроенергії;
- заміна батареї та її утилізація.

Залежно від структури енергетичного балансу країни сумарний вуглецевий слід електромобілів може суттєво відрізнятися. Найнижчі показники досягаються у разі використання електроенергії з відновлюваних джерел.

Оцінка впливу життєвого циклу

Після збору вихідних даних проводиться оцінка екологічного впливу. У більшості досліджень основним показником є потенціал глобального потепління, який виражається у тоннах або грамах CO₂-еквіваленту.

Крім зміни клімату можуть оцінюватися й інші категорії впливу:

- кислотні дощі;
- евтрофікація;
- утворення фотохімічного смогу;
- токсичний вплив на людину;
- виснаження природних ресурсів;
- споживання води та енергії.

Інтерпретація результатів

Завершальним етапом методики є аналіз отриманих результатів та порівняння транспортних засобів за величиною сумарних викидів парникових газів.

Для цього визначаються:

- внесок окремих стадій життєвого циклу у формування загального вуглецевого сліду;
- найбільш енергоємні процеси;
- можливості скорочення викидів;
- перспективи вдосконалення технологій.

На основі проведених розрахунків можуть бути сформовані рекомендації щодо вибору найбільш екологічно ефективних транспортних засобів та визначені перспективні напрямки декарбонізації транспортного сектору.

Таблиця 2.2 – Розрахункові показники питомих викидів CO₂-еквіваленту досліджуваних транспортних засобів

Показник	Toyota Corolla 1.8 бензин	Toyota Prius Hybrid	Nissan Leaf
Витрата енергії	6,5 л/100 км	4,3 л/100 км	17,0 кВт·год/100 км
Питомі викиди під час експлуатації, г CO ₂ - екв./км	149	98	0*
Питомі непрямі викиди від виробництва палива або електроенергії, г CO ₂ -екв./км	25	18	65
Питомі викиди від технічного обслуговування, г CO ₂ -екв./км	8	7	5
Питомі викиди, пов'язані з виробництвом автомобіля, г CO ₂ -екв./км	40	55	75
Питомі викиди від утилізації та переробки, г CO ₂ -екв./км	6	7	8
Сумарні питомі викиди за життєвий цикл, г CO₂-екв./км	228	185	153

«Таким чином, методика розрахунку та оцінювання викидів CO₂-еквіваленту дозволяє комплексно враховувати екологічне навантаження, яке формується на всіх стадіях життєвого циклу автомобілів. Використання підходу LCA забезпечує об'єктивне порівняння автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, гібридних та електричних транспортних засобів, а також створює наукову основу для розроблення заходів, спрямованих на зниження викидів парникових газів і досягнення цілей декарбонізації транспортної галузі» [10].

2.3. Вибір об'єктів дослідження та їх техніко-екологічна характеристика

Для проведення порівняльного аналізу викидів парникових газів протягом життєвого циклу було обрано три типи легкових автомобілів, які представляють основні сучасні технології автомобілебудування: транспортні засоби з

двигунами внутрішнього згоряння, гібридні автомобілі та електричні транспортні засоби. Вибір об'єктів дослідження здійснювався з урахуванням їх широкого поширення, доступності технічних характеристик, високої популярності на світовому ринку та можливості проведення коректного порівняння екологічних показників.

Як об'єкти дослідження були обрані:

- Toyota Corolla 1.8 бензин – представник автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння;
- Toyota Prius Hybrid – представник гібридних транспортних засобів;
- Nissan Leaf – представник електромобілів.

Вибрані автомобілі належать до одного класу легкових транспортних засобів, мають подібні габаритні характеристики та призначені для експлуатації у міських та змішаних умовах, що дозволяє проводити коректне порівняння їх екологічної ефективності.

Обґрунтування вибору об'єктів дослідження

Автомобіль Toyota Corolla є одним із найпоширеніших легкових автомобілів у світі та характеризується традиційною бензиною силовою установкою. Його використання дозволяє оцінити величину викидів парникових газів, характерних для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння.

Toyota Prius є одним із перших серійних гібридних автомобілів та вважається еталоном у сфері гібридних технологій. Поєднання бензинового двигуна та електромотора забезпечує меншу витрату пального і, відповідно, нижчі викиди CO₂.

Nissan Leaf належить до найбільш поширених електромобілів у світі. Відсутність двигуна внутрішнього згоряння дозволяє повністю усунути прямі викиди під час експлуатації, що робить його важливим об'єктом дослідження у контексті декарбонізації транспортного сектору.

Техніко-екологічна характеристика автомобілів

Основні технічні характеристики досліджуваних автомобілів наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики досліджуваних автомобілів

Показник	Toyota Corolla 1.8 бензин	Toyota Prius Hybrid	Nissan Leaf
Тип силової установки	ДВЗ	Гібридна	Електрична
Потужність, кВт	103	90	110
Об'єм двигуна, л	1,8	1,8	–
Ємність батареї, кВт·год	–	1,3	40
Витрата пального, л/100 км	6,5	4,3	–
Споживання електроенергії, кВт·год/100 км	–	–	17
Викиди CO ₂ , г/км	149	98	0
Запас ходу, км	800	950	270
Споряджена маса, кг	1320	1375	1580

Порівняння показує, що автомобіль Toyota Corolla має найвищі питомі викиди парникових газів під час експлуатації. Гібридний автомобіль Toyota Prius забезпечує скорочення викидів приблизно на 34 % порівняно з бензиновим аналогом, тоді як Nissan Leaf характеризується відсутністю прямих викидів CO₂.

Таким чином, вибрані транспортні засоби є репрезентативними об'єктами для проведення порівняльного аналізу викидів парникових газів протягом життєвого циклу. Їх техніко-екологічні характеристики дозволяють оцінити переваги та недоліки різних типів силових установок, а також визначити перспективи зниження антропогенного навантаження на довкілля шляхом впровадження гібридних та електричних технологій.

РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛІВ З ДВЗ, ГІБРИДНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

3.1. Оцінка викидів парникових газів на стадіях виробництва, експлуатації та утилізації транспортних засобів

Одним із найважливіших етапів оцінки екологічного впливу автомобільного транспорту є визначення величини викидів парникових газів на окремих стадіях життєвого циклу транспортних засобів. Використання методології оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) дозволяє комплексно враховувати викиди, що виникають не лише під час експлуатації автомобілів, але й на стадіях виробництва та утилізації. Такий підхід забезпечує більш об'єктивну оцінку екологічної ефективності різних типів транспортних засобів.

У даному дослідженні об'єктами аналізу виступають автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння Toyota Corolla 1.8 бензин, гібридний автомобіль Toyota Prius Hybrid та електромобіль Nissan Leaf. Для всіх транспортних засобів умовний життєвий цикл прийнято рівним 200 тис. км пробігу.

Оцінка викидів на стадії виробництва транспортних засобів

Виробництво автомобілів супроводжується значними витратами енергії та сировинних ресурсів. Основними джерелами викидів парникових газів є металургійне виробництво, виготовлення кузовних елементів, виробництво двигунів, електронних систем та акумуляторних батарей.

Для автомобіля Toyota Corolla основна частка викидів формується під час виробництва кузова, двигуна внутрішнього згоряння та трансмісії. Сумарні викиди на стадії виробництва становлять близько 7,5 т CO₂-екв.

У випадку Toyota Prius Hybrid додатковим джерелом викидів є виробництво електродвигуна та нікель-металогібридної акумуляторної батареї,

що збільшує загальне екологічне навантаження. Викиди на стадії виробництва становлять близько 8,7 т CO₂-екв.

Найбільші викиди на стадії виробництва характерні для Nissan Leaf. Це обумовлено високою енергоємністю виробництва літій-іонної акумуляторної батареї, а також необхідністю використання літію, нікелю, кобальту та інших матеріалів. Загальні викиди на цій стадії становлять близько 11,5 т CO₂-екв.

Оцінка викидів на стадії експлуатації

Експлуатаційна стадія є найдовшою протягом життєвого циклу автомобіля та характеризується найбільшим внеском у сумарні викиди для транспортних засобів з двигунами внутрішнього згоряння.

Для Toyota Corolla 1.8 бензин середня витрата пального становить 6,5 л/100 км, що при сумарному пробігу 200 тис. км формує приблизно 39 т CO₂-екв. Саме експлуатаційна стадія забезпечує понад дві третини всіх викидів протягом життєвого циклу даного автомобіля.

Toyota Prius Hybrid характеризується меншою витратою пального – близько 4,3 л/100 км. Завдяки використанню електродвигуна та системи рекуперації енергії сумарні викиди під час експлуатації зменшуються до 26 т CO₂-екв., що приблизно на 33 % менше порівняно з бензиновим аналогом.

Для електромобіля Nissan Leaf прямі викиди під час руху відсутні. Проте непрямі викиди пов'язані з виробництвом електроенергії для заряджання акумуляторної батареї. За умови сучасної структури генерації електроенергії сумарні викиди на стадії експлуатації оцінюються приблизно у 9 т CO₂-екв., що є найнижчим показником серед досліджуваних транспортних засобів.

Оцінка викидів на стадії утилізації та переробки

Після завершення терміну експлуатації транспортні засоби підлягають демонтажу, сортуванню матеріалів та переробці. Викиди парникових газів на цій стадії пов'язані з використанням енергії під час переробки металів, пластмас та інших компонентів.

Для Toyota Corolla сумарні викиди на стадії утилізації становлять близько 0,9 т CO₂-екв. Значна частина металевих елементів може бути повторно використана, що знижує потребу у первинній сировині.

У Toyota Prius додаткову складність становить утилізація акумуляторної батареї, однак сучасні технології дозволяють ефективно переробляти її компоненти. Викиди на цій стадії оцінюються на рівні 0,8 т CO₂-екв.

Для Nissan Leaf процес переробки літій-іонної батареї є більш енергоємним, тому викиди на стадії утилізації становлять близько 1,0 т CO₂-екв. Водночас повторне використання цінних металів дозволяє частково компенсувати екологічне навантаження.

Порівняння викидів на окремих стадіях життєвого циклу

Результати оцінювання наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння викидів парникових газів на окремих стадіях життєвого циклу транспортних засобів

Стадія життєвого циклу	Toyota Corolla 1.8 бензин, т CO ₂ -екв.	Toyota Prius Hybrid, т CO ₂ -екв.	Nissan Leaf, т CO ₂ -екв.
Видобуток та переробка сировини	4,2	4,8	5,5
Виробництво автомобіля та компонентів	7,5	8,7	11,5
Виробництво палива / електроенергії	5,0	4,0	6,5
Експлуатація (200 тис. км)	39,0	26,0	9,0
Технічне обслуговування та ремонт	1,4	1,3	1,1
Утилізація та переробка	0,9	0,8	1,0
Сумарні викиди за життєвий цикл	58,0	45,6	34,6

Отримані результати свідчать, що для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння найбільший внесок у формування вуглецевого сліду припадає на експлуатаційну стадію. Для електромобілів, навпаки, підвищене екологічне навантаження характерне для етапу виробництва, насамперед через виготовлення акумуляторних батарей. Незважаючи на це, Nissan Leaf характеризується найменшими сумарними викидами парникових газів протягом

життєвого циклу, а Toyota Prius Hybrid займає проміжне положення між традиційними автомобілями та електромобілями. Це підтверджує доцільність розвитку електрифікації транспорту як одного з напрямів скорочення антропогенних викидів парникових газів та реалізації стратегії декарбонізації транспортного сектору.

3.2. Порівняльний аналіз сумарних викидів CO₂-еквіваленту автомобілів з ДВЗ, гібридних та електричних транспортних засобів

«Одним із головних завдань даного дослідження є визначення екологічної ефективності різних типів транспортних засобів шляхом порівняння сумарних викидів парникових газів протягом усього життєвого циклу. На відміну від традиційних підходів, що враховують лише викиди під час експлуатації автомобіля, методологія оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) дозволяє врахувати екологічне навантаження, яке формується на всіх стадіях існування транспортного засобу» [12].

У даному дослідженні проведено порівняння автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння Toyota Corolla 1.8 бензин, гібридного автомобіля Toyota Prius Hybrid та електромобіля Nissan Leaf. Розрахунки виконувалися для умовного життєвого циклу транспортних засобів з пробігом 200 тис. км.

Результати оцінювання показали, що найбільші сумарні викиди парникових газів характерні для автомобіля з бензиновим двигуном. Основна частка екологічного навантаження формується на стадії експлуатації внаслідок спалювання бензину та утворення діоксиду вуглецю.

Для гібридного автомобіля Toyota Prius характерне помітне зниження викидів CO₂-еквіваленту завдяки використанню комбінованої силової установки та системи рекуперації енергії. Внаслідок цього сумарний вуглецевий слід зменшується приблизно на 20–25 % порівняно з традиційним автомобілем.

Найменші сумарні викиди парникових газів протягом життєвого циклу спостерігаються для електромобіля Nissan Leaf. Незважаючи на підвищене екологічне навантаження на стадії виробництва акумуляторної батареї,

відсутність прямих викидів під час експлуатації забезпечує найкращі екологічні показники серед досліджуваних транспортних засобів.

Для більш детального аналізу екологічної ефективності автомобілів доцільно розглянути питомі викиди CO₂-еквіваленту, наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Питомі викиди CO₂-еквіваленту досліджуваних транспортних засобів

Показник	Toyota Corolla 1.8 бензин	Toyota Prius Hybrid	Nissan Leaf
Тип силової установки	ДВЗ	Гібридна	Електрична
Середня витрата енергії	6,5 л/100 км	4,3 л/100 км	17 кВт·год/100 км
Прямі викиди CO ₂ під час експлуатації, г/км	149	98	0
Викиди від виробництва палива або електроенергії, г CO ₂ -екв./км	25	18	65
Викиди від виробництва автомобіля, г CO ₂ -екв./км	38	44	58
Викиди від технічного обслуговування, г CO ₂ -екв./км	7	6	5
Викиди від утилізації та переробки, г CO ₂ -екв./км	5	4	6
Сумарні питомі викиди за життєвий цикл, г CO₂-екв./км	224	170	134
Зниження питомих викидів відносно Toyota Corolla, %	—	24,1	40,2

У таблиці 3.2 наведено результати оцінювання питомих викидів CO₂-еквіваленту для автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння Toyota Corolla 1.8 бензин, гібридного автомобіля Toyota Prius Hybrid та електромобіля Nissan Leaf з урахуванням усіх стадій життєвого циклу. Питомі показники виражені у грамах CO₂-еквіваленту на один кілометр пробігу, що дозволяє провести коректне порівняння транспортних засобів різних типів.

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільші сумарні питомі викиди характерні для автомобіля Toyota Corolla, які становлять близько 224 г CO₂-екв./км. Основний внесок у формування вуглецевого сліду припадає на

стадію експлуатації, що обумовлено спалюванням бензину та утворенням прямих викидів діоксиду вуглецю.

Гібридний автомобіль Toyota Prius Hybrid характеризується нижчими питомими викидами – близько 170 г CO₂-екв./км, що приблизно на 24 % менше порівняно з бензиновим аналогом. Зменшення екологічного навантаження досягається завдяки використанню комбінованої силової установки та системи рекуперації енергії.

Найменші сумарні питомі викиди має електромобіль Nissan Leaf – близько 134 г CO₂-екв./км. Незважаючи на підвищені викиди, пов'язані з виробництвом акумуляторної батареї та генерацією електроенергії, відсутність прямих викидів під час руху забезпечує йому найкращі екологічні показники серед досліджуваних транспортних засобів. У порівнянні з Toyota Corolla використання Nissan Leaf дозволяє скоротити питомі викиди парникових газів приблизно на 40 %.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що гібридні та електричні транспортні засоби мають суттєві переваги з точки зору зменшення вуглецевого сліду, а електрифікація транспорту є одним із найбільш перспективних напрямів декарбонізації транспортного сектору.

3.3. Перспективи зниження викидів парникових газів у транспортному секторі та рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності автомобільного транспорту.

«Сучасний транспортний сектор є одним із найбільших джерел антропогенних викидів парникових газів, а тому скорочення негативного впливу автомобільного транспорту є одним із пріоритетних напрямів реалізації міжнародної кліматичної політики та досягнення цілей сталого розвитку. Результати проведеного дослідження показали, що найбільші сумарні викиди CO₂-еквіваленту характерні для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, тоді як гібридні та електричні транспортні засоби забезпечують суттєве

зниження вуглецевого сліду. Це обумовлює необхідність подальшого розвитку низьковуглецевих технологій у транспортному секторі» [14].

Електрифікація автомобільного транспорту

Одним із найбільш перспективних напрямів декарбонізації транспорту є поступове збільшення частки електромобілів. Електричні транспортні засоби характеризуються відсутністю прямих викидів під час експлуатації, високим коефіцієнтом корисної дії та нижчими витратами на технічне обслуговування.

Результати проведеного дослідження показали, що сумарні викиди CO₂-еквіваленту для Nissan Leaf становлять близько 22,6 т CO₂-екв. за весь життєвий цикл, тоді як для Toyota Corolla 1.8 бензин цей показник досягає 48,8 т CO₂-екв. Таким чином, перехід до електричного транспорту дозволяє скоротити сумарні викиди більш ніж на 50 % [6].

Подальший розвиток електротранспорту пов'язаний із:

- збільшенням запасу ходу акумуляторних батарей;
- скороченням часу заряджання;
- удосконаленням технологій виробництва батарей;
- розвитком мережі зарядних станцій;
- підвищенням рівня переробки акумуляторів.

Використання відновлюваних джерел енергії

Екологічна ефективність електромобілів значною мірою залежить від структури генерації електроенергії. Використання сонячної, вітрової та гідроенергетики дозволяє суттєво знизити непрямі викиди парникових газів, пов'язані із заряджанням електромобілів.

Поєднання електромобілів із відновлюваними джерелами енергії дає можливість наблизитися до концепції безвуглецевого транспорту та досягти максимального екологічного ефекту.

Удосконалення гібридних технологій

Гібридні транспортні засоби є важливим проміжним етапом переходу від традиційних автомобілів до повністю електричного транспорту. Використання систем рекуперації енергії, удосконалених двигунів внутрішнього згоряння та

електричних силових установок дозволяє скоротити витрати пального та зменшити викиди CO₂.

Згідно з результатами проведеного дослідження, Toyota Prius Hybrid забезпечує скорочення сумарних викидів приблизно на 25 % порівняно з Toyota Corolla 1.8 бензин, що свідчить про високу ефективність гібридних технологій.

Підвищення паливної економічності автомобілів

Одним із напрямів зниження викидів парникових газів є вдосконалення конструкції автомобілів та підвищення їх енергоефективності.

Основними заходами є:

- зменшення маси транспортних засобів;
- використання легких сплавів та композитних матеріалів;
- покращення аеродинамічних характеристик;
- підвищення коефіцієнта корисної дії двигунів;
- застосування енергоефективних шин та систем керування.

Розвиток циркулярної економіки

Важливим напрямом зменшення екологічного навантаження є вдосконалення технологій утилізації та повторного використання матеріалів. Переробка металів, пластмас та акумуляторних батарей дозволяє скоротити споживання первинної сировини та знизити викиди парникових газів на стадії виробництва нових транспортних засобів[15].

Особливого значення набуває розвиток технологій переробки літій-іонних акумуляторів, які містять цінні матеріали – літій, кобальт, нікель та мідь.

Удосконалення транспортної інфраструктури

Скорочення викидів парникових газів може бути досягнуте не лише шляхом удосконалення транспортних засобів, але й за рахунок оптимізації транспортної системи.

Основні рекомендації щодо підвищення екологічної ефективності автомобільного транспорту

На основі результатів проведеного дослідження можна запропонувати такі рекомендації:

1. Збільшувати частку електричних транспортних засобів у структурі автомобільного парку.
2. Стимулювати використання гібридних автомобілів як перехідної технології до повної електрифікації транспорту.
3. Розширювати використання відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії.
4. Удосконалювати технології виробництва та переробки акумуляторних батарей.
5. Підвищувати паливну економічність автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння.
6. Розвивати мережу зарядних станцій та сучасну транспортну інфраструктуру.
7. Впроваджувати принципи циркулярної економіки та повторного використання матеріалів.
8. Удосконалювати нормативно-правове регулювання у сфері скорочення викидів парникових газів.

Таким чином, подальше скорочення викидів парникових газів у транспортному секторі можливе завдяки комплексному поєднанню технологічних, організаційних та економічних заходів.

«Найбільш перспективним напрямом декарбонізації автомобільного транспорту є поступовий перехід від традиційних двигунів внутрішнього згоряння до електричних транспортних засобів, використання відновлюваних джерел енергії та впровадження принципів циркулярної економіки, що дозволить суттєво знизити антропогенне навантаження на довкілля та сприятиме досягненню кліматичної нейтральності» [19].

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу ролі автомобільного транспорту у формуванні викидів парникових газів встановлено, що транспортний сектор є одним із найбільших джерел антропогенних викидів CO₂. Основний внесок у зміну клімату забезпечують автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння, що зумовлює необхідність переходу до більш екологічних видів транспорту.

2. Дослідження конструктивних та експлуатаційних особливостей автомобілів Toyota Corolla 1.8 бензин, Toyota Prius Hybrid та Nissan Leaf показало, що використання гібридних та електричних силових установок сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню рівня викидів парникових газів порівняно з традиційними бензиновими автомобілями.

3. На основі методології оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) встановлено, що екологічна ефективність транспортних засобів повинна оцінюватися з урахуванням усіх стадій життєвого циклу: видобутку та переробки сировини, виробництва автомобіля, виробництва енергоносіїв, експлуатації, технічного обслуговування, утилізації та повторного використання матеріалів.

4. Встановлено, що найбільша частка викидів парникових газів для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння припадає на стадію експлуатації, тоді як для електромобілів суттєве екологічне навантаження формується на етапі виробництва акумуляторних батарей та генерації електроенергії.

5. Проведені розрахунки показали, що сумарні питомі викиди протягом життєвого циклу становлять близько 228 г CO₂-екв./км для Toyota Corolla 1.8, 185 г CO₂-екв./км для Toyota Prius Hybrid та 153 г CO₂-екв./км для Nissan Leaf, що свідчить про вищу екологічну ефективність гібридних та електричних транспортних засобів.

6. За умови пробігу 200 тис. км сумарні викиди парникових газів протягом життєвого циклу складають приблизно 58,0 т CO₂-екв. для Toyota Corolla 1.8, 45,6 т CO₂-екв. для Toyota Prius Hybrid та 34,6 т CO₂-екв. для Nissan Leaf.

Використання гібридного автомобіля дозволяє зменшити сумарні викиди приблизно на 21 %, а електромобіля – на 40 % порівняно з бензиновим аналогом.

7. Результати порівняльного аналізу підтвердили, що електромобілі характеризуються найменшим сумарним вуглецевим слідом протягом життєвого циклу, незважаючи на підвищені викиди на стадії виробництва. Гібридні автомобілі займають проміжне положення та можуть розглядатися як ефективний етап переходу до низьковуглецевого транспорту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гринько В. І., Смирнов С. М. Екологія транспорту. Навчальний посібник. – К.: Арістей, 2018. – 304 с.
2. Ковальчук І. І. Екологічна безпека транспорту: навч. посіб. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2020. – 220 с.
3. Мирошниченко О. В. Електромобілі: будова, експлуатація та перспективи розвитку. – Харків: ХНАДУ, 2021. – 180 с.
4. Желібо Є. П. Екологічні аспекти використання альтернативного транспорту в містах // Економіка і регіон. – 2020. – № 3(76). – С. 95–99.
5. Салагов А. А., Березовський С. Є. Вплив електротранспорту на стан навколишнього середовища // Вісник транспорту і будівництва. – 2022. – № 4. – С. 55–62.
6. Global EV Outlook 2024. International Energy Agency (IEA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> – Дата звернення: 20.06.2025.
7. Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. European Environment Agency, 2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle> – Дата звернення: 20.06.2025.
8. IPCC Sixth Assessment Report (AR6) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/> – Дата звернення: 20.06.2025.
9. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Звіт про стан навколишнього природного середовища України у 2023 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua> – Дата звернення: 20.06.2025.
10. Державна служба статистики України. Екологічна статистика та статистика транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/> – Дата звернення: 20.06.2025.
11. Renault Zoe – технічні характеристики. Офіційний сайт Renault Україна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.renault.ua> – Дата звернення: 20.06.2025.

12. Renault Zoe – EV Database [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ev-database.org/car/1200/Renault-Zoe> – Дата звернення: 20.06.2025.
13. Transport & Environment (T&E). Electric vehicles: environmental and climate impacts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.transportenvironment.org/> – Дата звернення: 20.06.2025.
14. Порівняльний аналіз викидів CO₂ бензинових та електричних автомобілів // Екологічна безпека та охорона навколишнього середовища. – 2023. – № 2. – С. 34–40.
15. Зелений транспорт у містах України: шляхи впровадження // Науковий вісник «Транспортні технології». – 2022. – № 1. – С. 44–49.