

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – ДП.1678 «С» 2023.09.27.09 ПЗ**

**Ільчук Андрій Володимирович**

**2024**

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**01.08 – ДП.1678 «С» 2023.09.27.09 ПЗ**

**Ільчук Андрій Володимирович**

**2024**

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

УДК 629.113

ПОГОДЖЕНО  
Декан факультету (Директор ННІ)  
механіко – технологічний факультет  
(назва факультету (ННІ))

\_\_\_\_\_  
(підпис) Братішко В.В.  
(ПІБ)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_  
(підпис) Калінін Є.І.  
(ПІБ)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Розробка комплексної оцінки екологічної безпеки та  
енергоефективності автомобілів»

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»  
(код і назва)

Освітня програма Автомобільний транспорт  
(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) Войтюк В.Д.  
(ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь та вчене звання) Калінін Є.І.  
(ПІБ)

Виконав

\_\_\_\_\_  
(підпис) Ільчук Андрій Володимирович  
(ПІБ)

КИЇВ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

тракторів, автомобілів та  
біоенергоресурсів

д.т.н., проф. \_\_\_\_\_ **Калінін Є.І.**  
(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту  
**Ільчуку Андрію Володимировичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність \_\_\_\_\_ **274 «Автомобільний транспорт»**  
(код і назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Розробка комплексної оцінки екологічної безпеки та енергоефективності автомобілів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «27» вересня 2023р. №1678 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру: \_\_\_\_\_ **01.10.2024**  
(рік, місяць, число)

**Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:** загальні дані по системам забезпечення та підвищення екологічності колісних машин, стандарти «Євро»

**Перелік питань які потрібно розробити** \_\_\_\_\_

Вступ. Стан питання, мета та задачі дослідження. Теоретичне основи оцінки екологічності транспортного засобу. Програма і методика проведення експериментальних досліджень. Висновки.

Перелік графічного матеріалу: Загальні принципи використання дизельних двигунів та методичні аспекти їх діагностування. Теоретичне дослідження екологічних показників колісних машин. Експериментальні дослідження. Результати експериментальних досліджень. Висновки.

Дата видачі завдання «09» січня 2024 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра \_\_\_\_\_

( підпис )

Калінін Є.І.  
(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

( підпис )

Ільчук А.В.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Основна частина дипломного проекту викладена на 64 сторінках пояснювальної записки і 10 слайдах презентації, має 8 таблиць та ілюстрована 18 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Розробка комплексної оцінки екологічної безпеки та енергоефективності автомобілів».

Об'єктом досліджень обрано автомобіль, що використовується в сільському господарстві.

Предметом досліджень є залежності, що дозволяють оцінити екологічність автомобіля в залежності від інших його показників.

Мета роботи – вдосконалення методики та засобів оцінки екологічності автомобілів та шляхів їх переведення на «зелені» технології.

У кваліфікаційній роботі виконане теоретичне та експериментальне дослідження, що дозволяє визначити економічну ефективність запланованих заходів зі скорочення викидів парникових газів при розробці та впровадженні різноманітних автомобільних компоновок у перспективному майбутньому до літа 2030 року.

Ключові слова: екологічні показники, автомобіль, зелені технології, відпрацьовані гази, викиди.

## ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ НОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ.....	7
1.1 Огляд етапів зниження викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобілів .....	7
1.2 Аналіз проблем зниження викиду парникових газів з відпрацьованими газами автомобілів для зменшення потепління клімату .....	13
1.3 Огляд та аналіз проблемних питань з викидами твердих частинок від автомобіля в атмосферу .....	16
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВДОСКОНАЛЕННІ КОНСТРУКЦІЙ АВТОМОБІЛІВ.....	19
2.1. Розробка методики об'єктивної оцінки екологічної безпеки автомобілів.....	19
2.2. Методика комплексного визначення енергоефективності при впровадженні екологічних та техніко-економічних заходів .....	25
2.3. Методи експериментальних досліджень автомобілів та силових установок.....	29
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АВТОМОБІЛІВ .....	32
3.1 Проведення за результатами порівняльних експериментальних випробувань та розрахункових досліджень екологічної небезпеки автомобілів.....	32
3.2 Розрахункові дослідження екологічної безпеки та енергоефективності різних ДВЗ та нових комбінованих енергетичних установок (КЕУ).....	35
3.3 Еколого-економічний аналіз потенційних екологічних переваг та недоліків виробництва та експлуатації електромобілів .....	40

РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ..	45
4.1 Аналіз ефективності використання традиційних та альтернативних палив для зниження викидів парникових газів .....	45
4.2 Визначення існуючих можливостей та аналіз проблемних питань економіки виробництва та експлуатації легкових автомобілів.....	47
4.3. Експериментальні дослідження та вибір оптимальних заходів .....	49
РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКОВІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	51
5.1 Аналітичне визначення викиду твердих частинок .....	51
5.2 Розрахункове визначення викиду твердих частинок при зносі гальмівних елементів під час експлуатації автомобілів.....	53
5.3 Експериментальне визначення дисперсності твердих частинок, що надходять в атмосферне повітря міст при зносі шин та дорожнього полотна.....	55
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТКИ.....	64

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНИХ ПИТАНЬ НОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

### 1.1 Огляд етапів зниження викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобілів

Відомо, що сучасний автотранспорт виділяє токсичні викиди, які забруднюють атмосферу та завдають шкоди навколишньому середовищу, людям і тваринам [1, 2, 3].

З моменту запровадження нормативів щодо викидів шкідливих речовин (ШР) з вихлопних газів (ВГ) автомобілів спочатку в США (1963 р.), а потім і в Європі (1968 р.) скорочення викидів [3, 4] відбулося значною мірою та почались інтенсивні дослідження з даного питання [5, 6, 7].

У великих містах і промислових районах у 1965-70 рр. був інтенсивний автомобільний рух. Частка токсичних речовин, що виділяються у вихлопних газах (ВГ), досягає 50...60% від загального об'єму шкідливих викидів, що надходять в атмосферу, включаючи промисловість. Основними токсичними компонентами, викиди яких обмежені спеціальними правилами та стандартами, є оксид вуглецю ( $CO$ ), вуглеводні ( $CH$ ), оксиди азоту ( $NO_x$ ), димність вихлопних газів та тверді частки (ТЧ) [8,9].

Непрямо нормувалися сполуки свинцю ( $Pb$ ) та сірки ( $SO_2$ ) за їх вмістом у бензинах та дизельних паливах. З відпрацьованими газами викидаються і такі токсичні речовини, як альдегіди ( $P_nCHO$ ) та поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), однією з найактивніше шкідливих канцерогенних речовин даного типу є бенз-(а)-пірен ( $C_{20}H_{12}$ ), проте вони не нормуються [5 – 9].

Роботи щодо зменшення забруднення повітря ВГ автомобільного транспорту та нормування гранично допустимих концентрацій токсичних речовин у відпрацьованих газах автомобілів вперше проводилися в США, в штаті Каліфорнія, де в 1959 році були прийняті стандарти на гранично допустимі концентрації окису вуглецю та вуглеводнів. У 1963 року у США

було затверджено державний стандарт, за основу якого був прийнятий каліфорнійський. У 1968 року було запропоновано проект стандарту ООН, а 1970 року рекомендовано до використання. У цих стандартах насамперед нормувалися гранично-допустимі викиди (ГДВ) оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих і картерних газах бензинових двигунів. Пояснюється це тим, що окис вуглецю становив у цей період переважну частину токсичних речовин, які знаходяться у відпрацьованих газах, причому токсичні властивості його змінюються залежно від кліматичних і метеорологічних умов.

Слід зазначити, що вуглеводні за своїми токсичними властивостями значно поступаються таким речовинам, як оксид вуглецю або оксиди азоту. Обмеження викиду вуглеводнів шляхом нормування ГДВ у відпрацьованих газах і ліквідація їх викиду з картерними газами було викликано насамперед у США прагненням уникнути фотохімічного туману (смогу), в утворенні якого вуглеводні, поряд з окислами азоту, як вважалося, грали визначальне значення. Такий підхід до нормування викиду вуглеводнів виявився на думку американських екологів, доцільним у США в 1959 році для запобігання утворенню смогу в штаті Каліфорнія, але не може бути визнаний як об'єктивний метод зниження загальної токсичності атмосфери міста, тому що гранично допустимі концентрації оксидів азоту набагато жорсткіші, ніж вуглеводнів, а викид оксидів азоту (за даними 1966 року) був тільки вдвічі менше, ніж вуглеводнів. Проте американські дослідники були змушені, в першу чергу, нормувати викид вуглеводнів, а не оксидів азоту, оскільки до моменту нормування було відомо, що зменшити викид вуглеводнів, що викидаються через відкриті системи вентиляції картера двигунів, значно простіше, якщо врахувати можливість його зменшення за рахунок ліквідації викиду з картерними газами шляхом повернення їх назад у двигун через систему всмоктування повітря (закриті системи вентиляції картера). Саме тому в каліфорнійському та федеральному стандартах США була наказана рекомендація щодо повернення картерних газів назад у

двигун через систему впуску. Ця рекомендація була екологічно помилковою, оскільки без додаткової фільтрації картерних газів відбувався підвищений викид дуже небезпечних канцерогенних речовин [8, 9, 10].

У 1968-70 роках на автополігоні було проведено дослідження різних вітчизняних та закордонних автомобілів з відкритими та закритими системами вентиляції картера ДВС [9, 10, 11].

При роботі з відкритою системою вентиляції картера у більшості автомобілів не зафіксовано викид бенз-(а)-пірену з відпрацьованими газами. Тоді як із закритою системою вентиляції картера відмічено значне збільшення викиду бенз-(а)-пірену з відпрацьованими газами у всіх випадках (див. рис. 1.1).

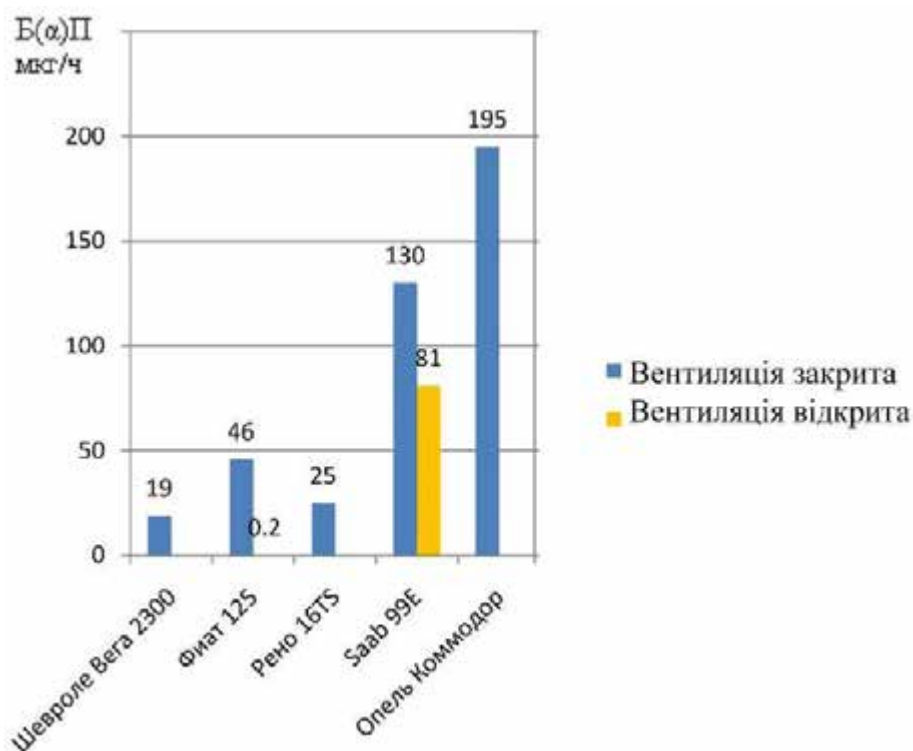


Рисунок 1.1 – Викид бензопірену з відпрацьованими газами при роботі двигунів різних автомобілів із закритими та відкритою системами вентиляції картера

Масове впровадження після 2005 р. систем нейтралізації відпрацьованих газів гарантовано забезпечувало різке зниження викиду ПАВ в відпрацьованих газах двигунів до мінімального рівня (у ряді випадків зниження становить від 10 до 100 разів) [3].

Після приєднання у 1987 році до Женевської угоди 1958 року, яку було ініційовано фахівцями, було прийнято пряме застосування Правил ООН, які діяли поряд із галузевими та державними стандартами, що обмежують шкідливі викиди. Відповідно до ОСТ 37.001.054-86 «Автомобілі та двигуни. Викид шкідливих речовин. Норми та методи визначення», діють норми для підготовлених автомобілів приблизно на 20% жорсткіші, ніж для серійних автомобілів та на 12%, ніж вимоги Правил №15 ООН. Це було випереджувальне рішення щодо нормування продукції автомобілебудування.

Постійне збільшення маси викиду шкідливих речовин через зростання автомобільного парку у світі стимулювало міжнародне законодавство (Правила ООН) періодично оновлювати стандарти та посилювати нормативні вимоги щодо викиду шкідливих речовин автотранспортними засобами. Так, гранично допустимі викиди (ГДВ) шкідливих речовин  $CO$ ,  $CH$ ,  $NO_x$  у міжнародних Правилах ООН посилювалися в кілька етапів: за період з 1972 по 1986 рр., були більш жорсткими приблизно в 2,5 рази, а з 1986 по 1992 рр., другий етап, для категорій найбільш масових автомобілів приблизно в 5 разів.

З 1992 року пішов третій етап жорсткості нормативів Євро.

Слід зазначити, що ці нормативні вимоги для автомобілів не могли бути виконані без застосування систем нейтралізації відпрацьованих газів. Оскільки нейтралізатори не допускали використання етилованих бензинів (гранично допустима концентрація свинцю не повинна перевищувати 0,015 мг/л бензину), то для країн та окремих регіонів до повного переходу на постачання неетильованого бензину діяли старі вимоги Правил 15.04 ООН 1982 року.

Для вантажних автомобілів та автобусів з 1993 року було запроваджено Правила №49 ООН, які передбачають випробування двигуна на стенді за 13-режимним циклом (як і стандарт США для дизелів) для

оцінки викиду оксиду вуглецю, вуглеводнів, оксидів азоту та додатково твердих частинок із відпрацьованими газами.

Перехід із етильованих бензинів на неетильовані забезпечив суттєве зниження викиду. Припинення випуску етильованих бензинів практично вирішило проблему викиду з відпрацьованими газами двигунів у повітря надзвичайно шкідливих сполук свинцю (рис.1.2) [3, 6].

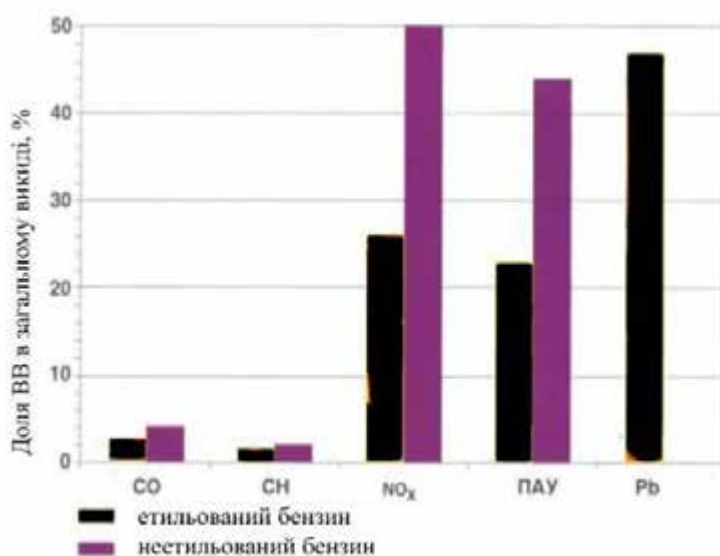


Рисунок 1.2 – Значимість викидів різних шкідливих речовин з відпрацьованими газами ДВС легкових автомобілів з урахуванням їх відносної агресивності

Аналіз проведених досліджень дозволив виявити та відзначити, що ряд дослідників звертають увагу на необхідність при проведенні робіт з метою зниження викидів ВГ здійснювати оцінку їх за загальною сумою викиду ВГ. Тому ряд розробників та дослідників застосовують метод простої сумарної маси ВГ.

Слід зазначити ще одну обставину. Якщо проаналізувати публікації, то виявляється, що відносна агресивність різних шкідливих компонентів ВГ за різними роками сильно змінюється, здебільшого зростає.

Справа тут, зрозуміло, не в зростанні токсикологічної агресивності шкідливих речовин відпрацьованих газів. Просто дослідники Всесвітньої організації охорони здоров'я та національні санітарні служби (медики та екологи), які визначають законодавчі документи, згодом уточнюють дані

про вплив різних шкідливих компонентів відпрацьованих газів на людину та навколишнє середовище. Найбільш виразно це проглядається на прикладі твердих частинок. Спочатку їх ототожнювали з вуглецем (сажа). Однак потім було встановлено, що у складі сажі, що викидається двигуном, є і поліциклічні ароматичні вуглеводні, що мають канцерогенну та мутагенну дію (близько 75 % мутагенів адсорбуються саме на сажі), що сильно підвищує її агресивність [5, 6, 7, 10]. Так було доведено, що показник відносної агресивності твердих частинок, що знаходяться в відпрацьованих газах дизелів, дорівнює 200 ум. кг/кг, а у двигунів, що працюють на неетильованих та етильованих бензинах, – 300 та 500 ум. кг/кг відповідно. Саме тому стосовно відпрацьованих газів двигунів термін «сажа» останнім часом майже не використовується, а замінюється терміном «тверді частинки» (ТЧ). З 1993 р. у Правилах 49 ООН для двигунів вантажних автомобілів було запроваджено норми на викид ТЧ, а з 2009 року у Правилах 83 ЄЕК ООН і для легкових автомобілів.

Однак, у 2012 році Всесвітня організація охорони здоров'я запропонувала заборонити використання автомобілів з дизельним двигуном у містах Європи через викид ними значної кількості твердих частинок з ВГ. При цьому ТЧ включають в себе як тверді частинки, так і краплі рідини, що знаходяться в повітрі і мають об'єм менше 2,5 мкм в діаметрі. Також вони згадуються в медичних документах як частинки, що «вдихаються», оскільки проникають глибоко в дихальну систему.

Країни Євросоюзу учасники Конвенції ООН «Про транскордонне забруднення повітря» у травні 2012 року прийняли історичні поправки до Протоколу 1999 року «Гетеборзької Конвенції», який вперше включатиме національні граничні рівні для дрібних твердих частинок, забруднювача, концентрація якого в повітрі свідомо перевищує стандарти якості повітря. Крім того, Конвенцією передбачено включення чорного вуглецю (сажі) як компонента твердих частинок, зважаючи на те, що чорний вуглець впливає у 680 разів більше на потепління клімату, ніж  $CO_2$  [9, 10, 11].

Отже, поетапне введення в останні 15 років нормативів Європейської економічної комісії (норми Євро) посилює контроль за викидами ШР з ВГ автомобілів, що природно призводить до ускладнення конструкцій автомобілів і подорожчання (підвищення) їх вартості. Виникає проблемне питання: чи існує економічна доцільність запровадження норм Євро 6 і вище відносно додаткового зниження викидів ШР, особливо твердих частинок з ВГ. Разом з тим, слід зазначити, що різко обмежуючи викиди твердих частинок з ВГ для дизельних двигунів більш ніж у 15...20 разів з 1992 року до теперішнього часу (за 10 років), законодавці не звертають увагу на інші шкідливі частинки, що викидаються автомобілями в процесі експлуатації за рахунок зносу систем та агрегатів автомобіля, таких, як гальмівні системи (накладки та диски), диски зчеплення та шини [2, 3].

Тому доцільно приступити до нормування в тому числі і викидів продуктів зносу шин, рівень викидів шкідливих частинок від яких, можливо, став вищим, ніж нормативи Євро 5 і, тим більше Євро 6 на викид твердих частинок з ВГ.

1.2 Аналіз проблем зниження викиду парникових газів з відпрацьованими газами автомобілів для зменшення потепління клімату

В останнє десятиліття зі збільшенням парку автомобілів інтенсивно наростає небезпечне забруднення атмосфери вуглекислим газом ( $CO_2$ ), що у великих кількостях містяться у відпрацьованих газах автомобілів.

Цей газ грає основну роль при формуванні парникового ефекту планети – явища, усунення якого у наш час стало глобальною проблемою.

Згідно з Кіотським протоколом 1997 р. промислово розвинені країни взяли на себе зобов'язання скоротити викиди «парникових» газів в атмосферу до кінця першого періоду зобов'язань (з 2008 по 2012 рр.) на 5% порівняно з рівнем викидів 1990 року. Конкретна величина зобов'язань різна для країн, і залежить від реального викиду для душу населення.

На рис. 1.3 наведено структуру викидів  $CO_2$  у світі за рахунок різних видів транспорту [2, 8].

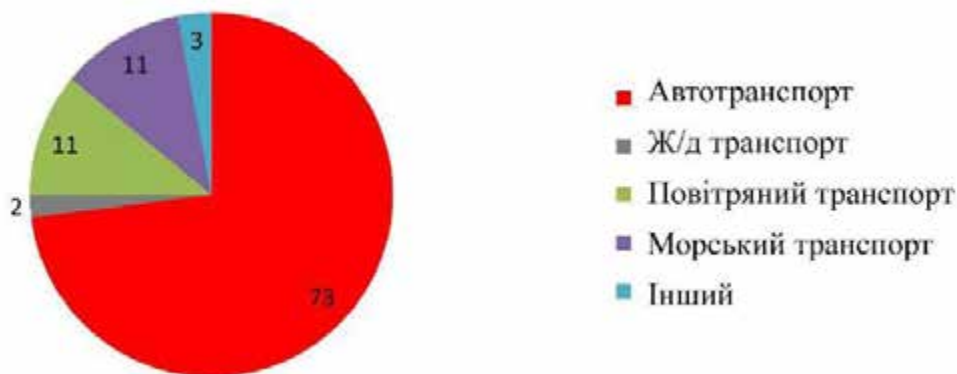


Рисунок 1.3 – Структура викидів  $CO_2$  від видів транспорту у світі у 2008 році

Члени АСЕА (Асоціації європейських автовиробників) добровільно запланували знизити середню величину викиду  $CO_2$  до 2012 р. – до 120 г/км. Визначення викиду  $CO_2$  здійснюється за методикою Правил ЄЕК ООН №101 за імітації «міського» та «заміського» циклу руху [4].

Рівень викиду  $CO_2$  відбиває рівень витрати палива автомобілем залежно від режиму руху, типу двигуна тощо. При випробуванні за стандартною методикою Правил ООН № 101 (Директиви 93/116/ЄЕС) витрата 1 кг палива автомобілем з бензиновим двигуном еквівалентна викиду близько 3,1 кг  $CO_2$ , з дизельним двигуном – близько 3,16 кг. Це природньо, оскільки у молекулах вуглеводнів, що входять у бензин та дизельне паливо, міститься відповідно від 4 до 12 та від 9 до 20 атомів вуглецю – С. Тому перехід на газове паливо – метан  $CH_4$  – є природним екологічно вигідним кроком з викидом 2,8 кг  $CO_2$  [16].

Проблема глобального потепління нині вважається найважливішою серед усіх екологічних проблем, із якими зіштовхнулося людство. Це було відзначено на конференції ООН у Кіото у 1997 р., на якій було визначено порядок, послідовність та зобов'язання країн щодо зниження викидів парникових газів (ПГ).

Подальше глобальне посилення екологічних норм на викид ШР доповнюється з 2009 року Європейськими вимогами викиду парникових газів ( $CO_2$ ) від автотранспорту.

В даний час у світі налічується вже понад 900 мільйонів автомобілів і щороку ця цифра збільшується ще на 55...60 млн., а щорічне світове споживання сирої нафти складає близько 3,4 мільярда тон. Експерти прогнозують дворазове збільшення чисельності транспорту за найближчі 20 років і таке ж збільшення споживання нафти. Якщо зростання світового парку автомобілів йтиме такими темпами, розвіданих запасів нафти вистачить приблизно на 40 років, а природного газу – на 60 років. Проведення активної енергозберігаючої політики практично у всіх сферах людської діяльності, розробка та послідовне впровадження програми енергозбереження та застосування нетрадиційних видів палив з відновлюваних джерел енергії є основним завданням практично всіх країн світу.

Використання водню як єдиного екологічно чистого енергоносія розглядається у більшості міжнародних проектах як фактор зниження екологічного тиску на довкілля.

Дійсно, при спалюванні водень не дає викидів  $CO_2$ . Вважається, що з використання водню як енергоносія, у принципі, автоматично вирішується планетарна проблема парникового ефекту і регіональні екологічні проблеми.

В даний час у нас в країні та за кордоном роботи ведуться в рамках програми «Екологічно чистий транспорт – Зелений автомобіль» з розширення застосування автомобілів з комбінованими енергоустановками, що дозволяють зменшити викид  $CO_2$  на 25...35% та електромобілів в умовах їхньої роботи в містах, а також міжгалузевої програми з поетапного впровадження водневої енергетики у транспортному комплексі. Остання має на меті створення інфраструктури використання водню на транспорті,

яка вимагатиме значних фінансових вкладень і в далекосяжній перспективі має бути завершена до 2030 року.

1.3 Огляд та аналіз проблемних питань з викидами твердих частинок від автомобіля в атмосферу

У травні 2012 року учасники Конвенції ЄЕК ООН «Про транскордонне забруднення повітря» ухвалили історичні поправки до Протоколу 1999 року «Гетеборгської Конвенції». Переглянутий Протокол вперше включатиме національні граничні рівні для дрібних твердих частинок.

Тверді частинки включають як тверді частинки, так і крапельки рідини, що містяться в повітрі і мають об'єм менше 2,5 мкм у діаметрі.

Їх вплив у короткостроковій перспективі (один день), а також на більш тривалі терміни (рік і більше), пов'язані з несприятливими наслідками для здоров'я населення великих міст.

Крім того, учасники Конвенції зробили прорив у сфері політики щодо транскордонного забруднення повітря, включивши чорний вуглець (або сажу), в якості компонента твердих частинок.

Чорний вуглець відомий як короткочасний кліматичний фактор, тому що він дуже впливає на процеси глобального потепління, але не зберігатися в атмосфері так довго як двоокис вуглецю ( $CO_2$ ).

Однак пізніші дослідження показали, що чорний вуглець впливає у 680 разів більше на потепління, ніж  $CO_2$ . Так, зокрема у глобальному дослідженні причин танення льодовиків зі зменшенням маси льоду на полюсах, що призводить до підвищення рівня моря, визначено необхідність зменшення викидів чорного вуглецю (сажі) і тому це є сьогодні найважливішим завданням у боротьбі зі зміною клімату [2, 11].

На додаток до прийнятих поправок щодо обмеження концентрації дрібних твердих частинок, були переглянуті й деякі технічні додатки до Протоколу. У оновленій версії було додано нові положення, що

регламентують граничні значення викидів (норми викидів) для ключових нерухомих джерел забруднення повітря (заводів, переробних підприємств та комунальних послуг), а також для пересувних джерел (автомобілів, літаків, морських та річкових суден, залізничного транспорту, і, навіть, газонокосарок).

Таким чином на підставі вищенаведеного аналізу виявлено та визначено необхідність комплексної оцінки екологічної безпеки транспортних засобів та економічної ефективності заходів зі зниження викидів ШР та парникових газів при розробці нових конструкцій автомобілів та силових установок, а також і застосовуваних нових енергоносіїв для можливості об'єктивного порівняння досягнутих результатів при впровадженні різноманітних екологічних заходів за методикою повного життєвого циклу (ПЖЦ) [2].

За результатами досліджень, проведених в Києві, основним забруднювачем міського повітря (понад 60% забруднюючих та небезпечних для здоров'я речовин) є зіпсована в дрібний пил гума автомобільних шин. Крім того, при русі автомобілів відбувається і знос дорожнього асфальтового полотна, в якому також міститься велика кількість шкідливих речовин.

Міжнародним агентством з вивчення раку підприємства гумової та шинної промисловості включені до списку канцерогеннонебезпечних.

Встановлено, що у шинному пилу присутні понад 140 хімічних сполук різного ступеня токсичності, але особливо небезпечні для здоров'я людини поліароматичні вуглеводні та леткі канцерогенні речовини *N*-нітрозаміни [2, 3].

Шкідливі речовини *N*-нітрозаміни, що містяться в дрібнодисперсному аерозолі, що виділяється автомобільними шинами, більш небезпечні для здоров'я людини тому що вони, при попаданні в бронхи і легені, протягом декількох діб переносяться безпосередньо в кров і лімфу людини за рахунок своєї гарної розчинності в воді та біологічних

рідинах. Наслідки наявності канцерогенних речовин у тканинних рідинах організму медицині добре відомі і часто призводять до смертей [2].

Наведені вище дані свідчать про те, що впливу канцерогенних речовин піддається широкий контингент населення, а не тільки персонал, безпосередньо зайнятий у виробництві автомобільних шин. Таким чином, виникає ціле коло питань, що відносяться до захисту від подібних впливів як у робочій зоні, так і від викидів канцерогенних речовин в атмосферне повітря населених місць.

Виконані у 1997-2001 р.р. дослідження хімічного складу шинного пилу та дрібнодисперсного аерозолю, взятих від протекторів різних шин вітчизняного та імпортного виробництва, дозволили визначити, що в кожному кілограмі шинного пилу та дрібнодисперсного аерозолю кількість летких *N*-нітрозамінів (канцерогенних речовин) може досягати від 20 до 70 мкг [2, 3].

## РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ВДОСКОНАЛЕННІ КОНСТРУКЦІЇ АВТОМОБІЛІВ

### 2.1. Розробка методики об'єктивної оцінки екологічної безпеки автомобілів

У початковий період робіт зі зниження викидів шкідливих речовин (ШР) з відпрацьованими газами (ВГ) та й в даний час застосовуються різні методи зменшення викидів ШР з ВГ двигунів, що відрізняються не тільки способом їх реалізації, а й результатами. Кожному методу притаманні свої якісні та кількісні показники складу відпрацьованих газів. Однак і кількісні, і якісні дані – умова необхідна, але не достатня для об'єктивної оцінки екологічної безпеки автомобілів з новими двигунами та силовими установками.

Як приклад, в розділі 1, були наведені дані щодо зміни сумарної маси –  $M_{BB}$  в г/км простим підсумовуванням викиду шкідливих речовин при здійсненні протитоксичних заходів на прикладі автомобілів ВАЗ.

У розділі 1 було зазначено що, на думку деяких дослідників, для об'єктивної оцінки, потрібно знати, які з компонентів ВГ становлять найбільшу небезпеку, тобто найбільш токсичні. Все це ускладнює оцінку шкідливості викидів від різних автомобілів, порівняння екологічної ефективності шляхом зниження токсичності конкретного двигуна або автомобіля; а також вибір та розробку заходів щодо зниження найбільш небезпечного забруднювача у складі ВГ. Тим більше, що, на думку деяких дослідників, дуже доцільно контролювати і ненормовані ШР в ВГ, оцінюючи впровадження у масове виробництво нових протитоксичних заходів [3, 7]. Тому при вирішенні цих та їм подібних завдань деякі дослідники зазвичай виходять із сумарної (приведеної) токсичності викидів ШР з ВГ. При цьому, в якості опорного (базового) забруднювача зазвичай використовували монооксид вуглецю,  $CO$ , його середньодобову гранично

допустиму концентрацію (ГДК) в атмосфері міста. Це означає, що його показник агресивності був прийнятий рівним одиниці. Показники ж для інших компонентів ШР вказують, у скільки разів за однакових умов збиток, що завдається аналізованим забруднювачем, більше шкоди, що завдається монооксидом вуглецю.

У табл. 2.1 наведено ГДК основних шкідливих компонентів ВГ, та як вони з різних років сильно змінювалися, здебільшого зростали.

Таблиця 2.1 – Відносна агресивність (токсичність) шкідливих речовин мг/м<sup>3</sup>

Токсичні компоненти відпрацьованих газів	1978 г.	1982 г.	1985 г.	1986 г.
Монооксид вуглецю	1,0	1,0	1,0	1,0
Окиси азоту	3,0	18,0	6,9	41,1
Вуглеводні	2,7	2,5	0,38	3,16
Тверді частинки	1,8	120,0	10,1	200,0
Оксиди сірки	2,0	14,0	6,4	22,0
<b>Сумарна токсичність (агресивність) <math>M_{BO}</math></b>	<b>10,5</b>	<b>155,5</b>	<b>24,8</b>	<b>267,3</b>

Справа тут, зрозуміло, не в зростанні агресивності самих шкідливих речовин відпрацьованих газів. Просто Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), а також структури охорони здоров'я країн, що визначають законодавчі документи, згодом уточнюють дані про вплив різних шкідливих компонентів відпрацьованих газів на людину і навколишнє середовище.

На нашу думку, використання показників «відносна агресивність» та «масовий викид» шкідливих речовин дозволяє оцінювати не лише просту сумарну токсичність викидів, а й частку окремих компонентів, і навіть визначати і питому збитки від нього в грн./км пробігу чи грн./кВт·год.

Зміна поглядів суттєво змінює і точку зору на внесок окремих компонентів у приведену за ГДК сумарну токсичність автомобілів із різними двигунами. Так, при розрахунку екологів за даними 1978 року більше 70% приведенного викиду бензинових двигунів припадало на монооксид вуглецю, а основним токсичним компонентом ВГ дизельних двигунів були окиси азоту. На частку твердих частинок у бензинових

двигунах припадало лише ~7% загальної токсичності. У розрахунках за даними 1986 р., найбільшу частку токсичності відпрацьованих газів як бензинових двигунів, так і дизелів, становили оксиди азоту і тверді частки, причому частка останніх у приведеному шкідливому викиді дизелів становила вже ~45%.

З вищевикладеного випливає висновок: нові погляди вимагають нових методів оцінки, і шляхів поліпшення екологічних показників двигунів.

Так, правильність обраного у 1970-ті роки курсу на дизелізацію автотранспорту зараз, коли вироблено нові уявлення про відносну агресивність токсичних компонентів відпрацьованих газів, особливо твердих частинок, вже поставлено під сумнів. Саме тому адміністративні органи низки міст Європи з 2008 року почали обговорювати питання щодо заборони експлуатації дизельних автобусів на території цих міст. Слід зазначити також і на позицію японських виробників та споживачів відносно скорочення застосування автомобілів із дизелями у містах Японії.

В 2012 року ВООЗ вийшла з пропозицією взагалі заборонити використання автомобілів з дизельними двигунами в містах Європи.

Отже, протягом останніх років, санітарними нормативами ряду країн, включаючи Україну, і Всесвітньою організацією охорони здоров'я змінювалися ГДК практично за всіма компонентами відпрацьованих газів, що ускладнювало оцінку, призводило до протилежних результатів відносно сумарної токсичності ВГ.

Слід зазначити, що встановлені в Україні ГДК для короткочасних та тривалих впливів для більшості забруднюючих речовин, за винятком бензолу, суворіші за стандарти якості повітря, що рекомендовані ВООЗ та встановлені директивами країн ЄС.

Крім того, санітарними службами України в 1999 році у «Тимчасовій методиці визначення екологічних збитків» за базовий показник було прийнято вже іншу шкідливу речовину – діоксид сірки  $SO_2$ , що взагалі

порушило систему порівняння ефективності заходів, що проводяться з попередніми дослідженнями.

Методика розрахунку та чисельні значення показників відносної агресивності (небезпеки) присутності ШР у повітрі наведені далі.

На підставі вищевикладеного, з метою підвищення об'єктивності та стабільності розрахунків з визначення сумарної токсичності ВГ та отримання логічної сумісності порівнюваних екологічних заходів щодо зниження викиду ШР з ВГ, пропонується використовувати в якості базового «незалежний показник» –  $ГДК_{нп}^{66}$ , величину якого умовно прийняти рівною  $1 \text{ мг/м}^3$ . В цьому випадку вже  $ГДК \text{ CO}$  і  $SO_2$  та їх можливі зміни будуть враховуватися в оцінці сумарної токсичності з урахуванням їх відносної агресивності разом з іншими ШР і значно підвищать об'єктивність розрахунків, що проводяться, і ефективність досліджуваних протитоксичних (екологічних) заходів.

Розрахунок відносної агресивності досліджуваних ШР ведеться за такою формулою:

$$A_i = \frac{ГДК_{нп}}{ГДК_i} = \frac{1}{ГДК_i}, \quad (2.1)$$

де  $ГДК_i$  –  $ГДК$  досліджуваної шкідливої речовини протягом доби в атмосферному повітрі.

Зіставляючи цю постійну величину –  $1 \text{ мг/м}^3$ , із встановленими санітарними нормами –  $ГДК_i$  на різні нормовані шкідливі речовини, а також і на ненормовані шкідливі речовини міжнародними стандартами, отримуємо на даний момент наступні значення (табл. 2.2) відносної величини ступеня агресивності (шкідливості) різних шкідливих речовин з ВГ.

Таблиця 2.2 – Величини агресивності різних ШР по відношенню до базового незалежного показника  $ГДК_{nn}$

Нормовані ШР	Не прямо нормовані ШР	Ненормовані ШР
$CO - 0,33$	$Pb - 3333$	$CHO - 333$
$CH - 6,3$	$SO_2 - 20$	Бенз-(а)-пірен – $10^6$
$NO_x - 25,0$	Ароматичні вуглеводні – 10	
$TC - 50$		

Таким чином, сумарна маса шкідливих речовин, що викидаються, приведена до  $ГДК_{nn}$  – умовної незалежної базової речовини, в цьому випадку визначається за формулою:

$$M_{\text{вв}}^{\text{нн}} = 0,33M_{CO} + 6,3M_{CH} + 25,0M_{NO_x} + 50M_{TC} + 3333M_{Pb} + 20M_{SO_2} + 333M_{CHO} + 10^6 M_{\text{бн}} \quad (2.2)$$

За допомогою цього розрахунку можна визначити значущість кожної ШР, її частку в загальному викиді ШР з ВГ при аналізі ефективності протитоксичних заходів або нових конструкцій автомобілів та їх силових установок під час випробувань за Правилами №49 (в г/кВт·год.) або за випробуваннями за Правилами №83 (в г/км).

Нижче в таблицях, як приклад наведено зміни показників простої суми викиду ШР –  $M_{\text{вв}}$  (табл. 2.3) та суми з урахуванням відносної агресивності ШР –  $M_{\text{вв}}^{\text{нн}}$  (табл. 2.4) норм Євро, що вводяться для вантажних автомобілів за правилами ЄЕК ООН № 49.

Таблиця 2.3 – Зміна показників простої суми викиду ШР за роками

Норми	Рік введення	Гранична норма (викиди) г/кВт·ч					
		$CO$	$CH$	$NO_x$	$TC$	$M_{\text{вв}}$	% зміни
Євро 1	1993	4,5	1,1	8	0,36	13,96	100
Євро 2	1996	4,0	1,1	7	0,15	12,25	87,5
Євро 3	2000	2,1	0,66	5	0,1	7,86	56,3
Євро 4	2005	1,5	0,46	3,5	0,02	5,48	39,2
Євро 5	2008	1,5	0,46	2,0	0,02	4,95	35,6
Євро 6	2013	1,5	0,13	0,4	0,01	2,04	14,6

Таблиця 2.4 – Зміна показників суми викиду ШР з урахуванням відносної агресивності за роками

Норми	Рік введення	Гранична норма з урахуванням $M_{66}^{nn}$ , г/кВт·год					
		$CO$	$CH$	$NO_x$	$ГЧ$	$M_{66}$	% зміни
Євро 1	1993	1,5	6,9	200	18	226,4	100
Євро 2	1996	1,3	6,9	175	7,5	190,7	84,23
Євро 3	2000	0,7	4,1	125	5	134,8	59,5
Євро 4	2005	0,5	2,9	87,5	1	91,9	40,6
Євро 5	2008	0,5	2,9	50	1	54,4	24,0
Євро 6	2013	0,5	0,8	10	0,5	11,8	5,2

З наведених таблиць видно велика різниця значущості викидів  $NO_x$  і  $ГЧ$  у загальному викиді шкідливих речовин особливо при нормах Євро 5 і Євро 6.

Узагальнюючи вищевикладені матеріали, можна зробити наступні висновки.

Показники відносної агресивності шкідливих речовин – величини, що залежать від ступеня вивченості їх впливу на людину та навколишнє середовище, тому вони можуть змінюватися за рішенням Всесвітньої організації охорони здоров'я та національних служб різних країн у міру накопичення знань про ці впливи.

Зважаючи на можливість у майбутньому зміни ГДК багатьма національними санітарними службами, необхідне використання запропонованого та обґрунтованого в цій методиці «незалежного базового показника» –  $ГДК_{nn} = 1 \text{ мг/м}^3$ , що не змінюється з часом при перегляді міжнародними та національними санітарними службами.

При проведенні дослідницьких робіт з модернізації серійних та розробки нових автомобілів та двигунів, доцільно та необхідно для об'єктивної оцінки їхньої екологічної безпеки використовувати показник сумарної токсичності ШР, що визначається з урахуванням відносної агресивності їх ГДК у повітрі населених місць –  $M_{66}^{nn}$ .

## 2.2 Методика комплексного визначення енергоефективності при впровадженні екологічних та техніко-економічних заходів

В даний час існують різні методи поліпшення екологічних показників автомобіля та його паливної системи, які можна розділити на два напрямки: перше – це вплив на регулярний процес паливної системи та її конструкцію; другий – знешкодження токсичних речовин у вихлопній системі двигуна в автомобілі.

Кожен метод має певний якісний і кількісний вплив на виділення різних шкідливих речовин, токсична дія яких також різна. Витрати на впровадження різних методів і витрати на їх експлуатацію істотно відрізняються.

Наявність різних методів зниження викидів шкідливих газів від вживаних автомобілів і кілька відмінностей в їх показниках значно ускладнює вибір оптимального методу для даного стану або комбінації декількох методів. Основними критеріями оцінки ефективності різних методів підвищення екологічності автомобілів повинні бути такі показники: рівень шкідливих викидів, ціна на паливо і ціна оновлених або нових автомобілів.

Тому на основі проведених досліджень запропоновано використовувати комплексну методологію еколого-економічної оцінки автомобільної продукції протягом життєвого циклу з метою підтвердження ефективності заходів зі зниження шкідливих викидів від автотранспорту, з метою розрахунку ефекту, що досягається різними методами, пристроями та системами очищення газів, яким вони віддають перевагу, новими силовими установками та іншими способами зниження негативного впливу автотранспорту на здоров'я людини та навколишнє середовище [2].

В основу комплексної методики покладено «Методику еколого-економічної оцінки ефективності застосування антитоксичних заходів, систем і пристроїв», розроблену у 2003 р. Методика враховує викиди шкідливих речовин, шкоду навколишньому середовищу внаслідок

негативної дії цих викидів та фінансові витрати на впровадження заходів щодо зменшення шкідливих викидів автотранспорту.

Загалом ми представляємо екологічні та економічні наслідки модернізації існуючого або виробництва нового автомобільного обладнання з урахуванням витрат на придбання (оновлення) та розрахунку, а також збитків, що наносяться навколишньому середовищу, у вигляді:

$$E = (Z^b - Z^n) + (Y^b - Y^n), \quad (2.3)$$

де  $Z$  – витрати на закупівлю (переоснащення) та експлуатацію;  $Y$  – шкода, що завдається навколишньому середовищу під час експлуатації; індекси: б – базовий варіант, н – модернізований чи новий варіант автомобіля.

Оцінка ефективності заходів щодо зниження впливу автомагістралі на навколишнє середовище базується на різниці (еколого-економічному ефекті) відповідних річних сукупних витрат та екологічному збитку по кожному з розглянутих варіантів та річних сукупних витрат і екологічних збитків базового (оригінального) варіанту.

Нижче наведено методику оцінки та екологічної шкоди прямих економічних витрат для навколишнє середовище.

*Методика оцінки екологічних збитків.* Методика оцінки збитків навколишньому середовищу заснована на «Тимчасовій методиці визначення екологічних збитків», що затверджена в 1999 р., з урахуванням її адаптації, для проведення розрахунків відносно автомобілів, їх компонентів та палив [8]. Методика розрахунку екологічної шкоди враховує вплив шкідливих речовин на здоров'я людини та навколишнє середовище, процеси вторинного перетворення речовин на більш агресивні, процеси повторного викиду домішок в атмосферу, наприклад, при осіданні на поверхнях. Методика враховує лише викиди ШР у повітря. Екологічна шкода навколишньому середовищу ( $Y$ ) розраховується так:

$$Y = Y^n - Y^b, \quad (2.4)$$

Тут і далі індекси «н» і «б» відносяться, відповідно, до нового автомобіля на альтернативному паливі та до базового автомобіля на традиційному паливі.

Екологічна (економічна) оцінка шкоди, заподіяної викидами забруднень в атмосферне повітря, для окремого джерела визначається за формулою, в грн./рік:

$$Y = \gamma \sigma f M, \quad (2.5)$$

де  $\gamma$  – нормативна константа, що переводить умовну оцінку викидів у грошову, грн./ум.т або доларів/ум.т. На момент поточних розрахунків величина була визначена рівною 51 грн./ум.т.;  $\sigma$  – показник небезпеки забруднення атмосфери над різними територіями;  $f$  – поправка, що враховує характер розсіювання домішок в атмосфері;  $M$  – приведена до  $SO_2$  маса річного викиду забруднень із джерела, ум.т/рік.

Відповідно до чинної «Тимчасової методики визначення запобігання екологічним збиткам» всі викиди шкідливих речовин в атмосферу приводять до діоксиду сірки  $SO_2$  з 1999 року.

Приведена маса річного викиду забруднень в атмосферу визначається за такою формулою:

$$M = \sum_{i=1}^N A_i m_i, \quad (2.6)$$

де  $m_i$  – маса річного викиду домішки  $i$ -го виду в атмосферу, т/рік;  $A_i$  – показник відносної агресивності домішки  $i$ -го виду, ум.т/т;  $N$  – загальна кількість домішок, що викидаються джерелом в атмосферу.

Значення  $A_i$  визначається на основі показника  $a_i$  відносної небезпеки присутності домішки у повітрі, що вдихається людиною, з урахуванням низки поправок. Значення  $A_i$  розраховуються за такою формулою:

$$A_i = a_i \alpha_i \delta_i \lambda_i \beta_i, \quad (2.7)$$

де  $a_i$  – показник відносної небезпеки присутності домішки у повітрі, що вдихається людиною;  $\alpha_i$  – поправка, що враховує ймовірність накопичення

вихідних домішок або вторинних забруднювачів у компонентах навколишнього середовища та в ланцюгах харчування, а також надходження домішки до організму людини неінгаляційним шляхом;  $\delta_i$  – поправка, що враховує дію на різні реципієнти, крім людини, якщо проводиться оцінка токсичної дії тільки на людину, приймається рівною 1;  $\lambda_i$  – поправка на ймовірність вторинного закидання домішок в атмосферу після осідання на поверхнях (вводиться для пилу);  $\beta_i$  – поправка на ймовірність утворення за участю вихідних домішок, викинутих в атмосферу, інших (вторинних) забруднювачів, небезпечніших за вихідні (вводиться для легких вуглеводнів).

Показник  $a_i$  та поправки безрозмірні; показнику  $A_i$  при його обчисленні надається розмірність ум.т/т.

Чисельне значення показника  $a_i$  визначається за формулою:

$$a_i = \left( \frac{ГДК_{SO_2,атм} \cdot ГДК_{SO_2,роб.зони}}{ГДК_{i,атм} \cdot ГДК_{роб.зони}} \right)^{1/2} = \frac{0,71}{(ГДК_{i,атм} \cdot ГДК_{роб.зони})^{1/2}} \cdot (2.8)$$

В якості  $ГДК_{атм}$  для даної речовини береться значення  $ГДК_{доб.}$ , а за відсутності останнього використовується  $ОБРВ_{атм}$  (орієнтовно безпечний рівень впливу).

*Методика оцінки прямих економічних витрат.* При оцінці витрат на стадії експлуатації як найбільш витратної стадії в ЖЦ, враховувалися головним чином великі витрати: витрати на паливо  $Z_m$ ; витрати на експлуатаційні матеріали  $Z_{ем}$ ; витрати на шини  $Z_{ш}$ ; витрати на технічне обслуговування, поточний та капітальний ремонт автомобіля (запасні частини, матеріали, оплата праці та ін.)  $Z_{рем}$ ; накладні витрати  $Z_n$ ; витрати на модернізацію інфраструктури  $Z_{інф}$ ; витрати на заробітну плату водіям  $Z_{зп}$ ; витрати на холості пробіги  $Z_{хп}$ ; витрати на амортизацію  $Z_{ам}$ .

У загальному вигляді річні сукупні витрати наростаючим підсумком на стадії експлуатації матимуть вигляд:

$$Z_{\text{рік}} = \sum_{i=1}^t (Z_m + Z_{em} + Z_{ш} + Z_{рем} + Z_n + Z_{інф} + Z_{зн} + Z_{xp} + Z_{ам}) \cdot \left( \frac{1}{(1+r)^t} \right), \quad (2.9)$$

де  $r$  – ставка норми дисконту;  $t$  – розрахунковий рік.

В якості розрахункового року прийнято календарний рік, що відповідає початку експлуатації автобусів і вантажних автомобілів.

Інфляційні очікування щодо зміни цін, присутніх у відповідних складових витрат у цьому розрахунку не розглядаються.

### 2.3. Методи експериментальних досліджень автомобілів та силових установок

Порівняльні випробування автомобілів з різними ДВЗ, що працюють на традиційних та альтернативних паливах, а також автомобілів з КЕУ та електромобілів проводилися на спеціалізованих стендах, обладнаних необхідною сучасною апаратурою для експериментальних та сертифікаційних досліджень відповідно до методів, що визначені міжнародними Правилами ООН №49, №83 та №101 (рис. 2.1 – 2.4).



Рисунок 2.1 – Стенд для випробувань автомобілів щодо визначення викидів шкідливих речовин, парникових газів та витрати палива за Правилами ООН №83



Рисунок 2.2 – Вимірювальна апаратура для вимірювання викидів шкідливих речовин, парникових газів та витрати палива при випробуваннях автомобілів за Правилами ООН №83

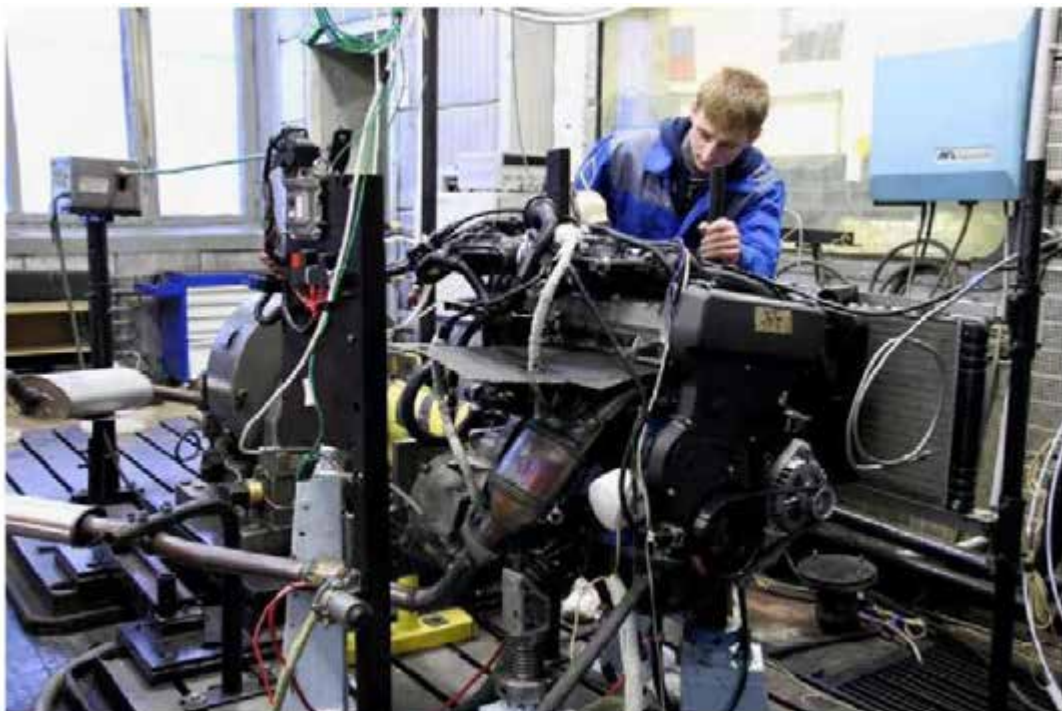


Рисунок 2.3 – Моторний стенд для випробувань двигунів за Правилами ООН №49



Рисунок 2.4 – Вимірювальна апаратура з тунелем для вимірювання твердих частинок, шкідливих речовин, парникових газів та витрати палива під час випробувань за Правилами ООН №49

### РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ АВТОМОБІЛІВ

Враховуючи значне зростання цін на нафту та проблеми отримання палива з відновлюваних джерел, однією з найпопулярніших тем у дискусіях про потенціал розвитку альтернативної енергетики є врахування відновлюваних джерел сировини та енергії.

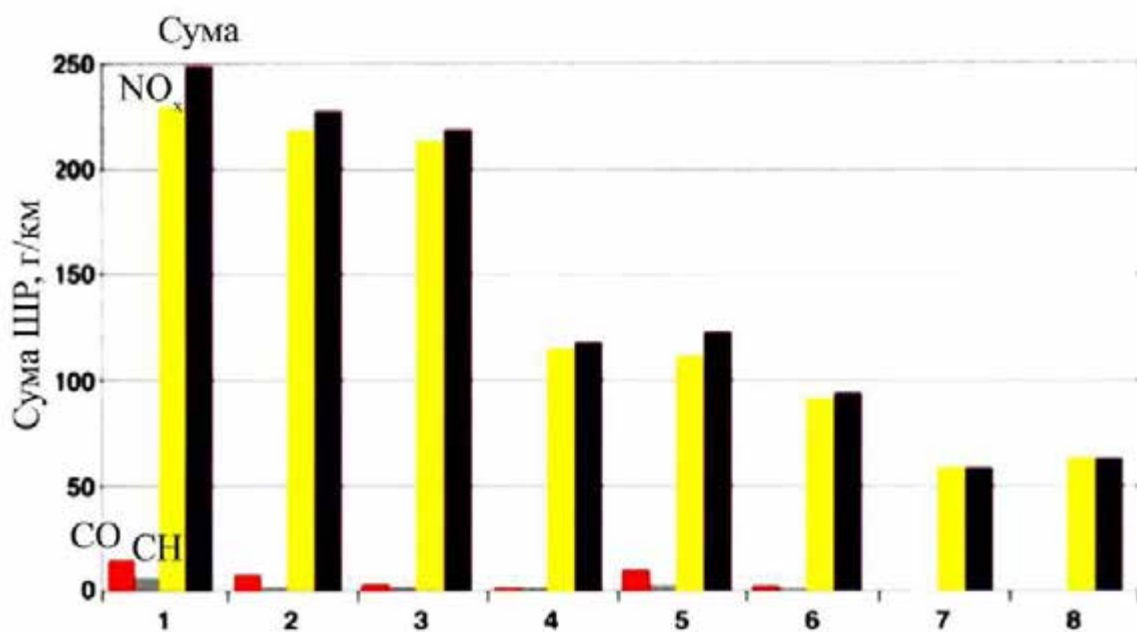
Публікації та заяви неоднозначно оцінюють реальну силу та цінність альтернативних джерел енергії, особливо тих, які пов'язані з біологічним відтворенням – так званих біоресурсів.

3.1 Проведення за результатами порівняльних експериментальних випробувань та розрахункових даних досліджень екологічної небезпеки автомобілів та двигунів при роботі на різних паливах з викиду шкідливих речовин з відпрацьованими газами

Результати порівняльних експериментальних випробувань наведено на рис. 3.1, а в табл. 3.1 – розрахунки з викиду нормованих шкідливих речовин легковими автомобілями «ВАЗ», що працюють на різних видах палива за їздовим циклом Правил ООН №83 з аналізом за простою сумарною масою викиду ШР –  $M_{\text{вв}}$  та за методикою, розробленою у 2 розділі з урахуванням відносної агресивності ШР –  $M_{\text{вв}}^{\text{нп}}$ .

Таблиця 3.1 – Розрахунки з викиду нормованих шкідливих речовин легковими автомобілями «ВАЗ»

Паливо	1	2	3	4	5	6	7	8
$M_{\text{вв}}$ , Г/КМ	250	228	220	125	120	93	60	65
$M_{\text{вв}}^{\text{нп}}$ , Г/КМ	5800	5500	4250	2875	2800	2250	1375	1625



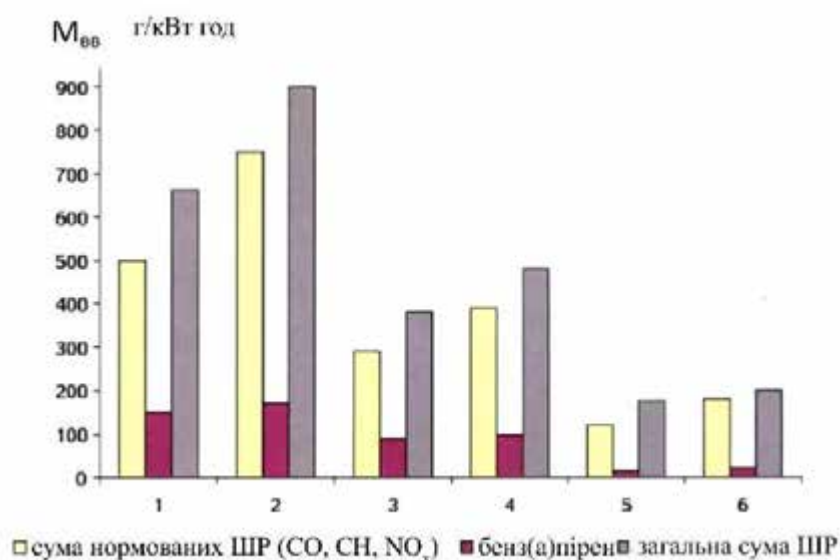
1 – бензин; 2 – скраплений нафтовий газ; 3 – стислий природний газ; 4 – бензин у суміші з воднем; 5 – метанол (метиловий спирт); 6 – метанол у суміші з синтез-газом; 7 – синтез-газ; 8 – водень

Рисунок 3.1 – Сумарний викид шкідливих речовин  $M_{66}$  легковим автомобілем «ВАЗ», що працює на різних паливах (енергоносіях)

На рис. 3.2 наведено результати експериментальних випробувань двигунів вантажних автомобілів за Правилами ООН № 49 у г/кВт·год з виміром нормованих шкідливих викидів і додатково з виміром ненормованого викиду особливо небезпечної канцерогенної речовини – бенз(а)пірена [3]. У табл. 3.2 наведено розрахунки викиду сумарної маси шкідливих речовин –  $M_{66}^{nn}$  з урахуванням відносної агресивності ШР.

Таблиця 3.2 – Розрахунки викиду сумарної маси шкідливих речовин –  $M_{66}^{nn}$  з урахуванням відносної агресивності ШР

Паливо	1	2	3	4	5	6
$M_{66}$ , г/км	670	890	380	490	140	180
$M_{66}^{nn}$ , г/км	$155 \cdot 10^6$	$188 \cdot 10^6$	$78 \cdot 10^6$	$84 \cdot 10^6$	$21 \cdot 10^6$	$27 \cdot 10^6$



1 – бензин; 2 – дизельне паливо; 3 – природний газ; 4 – скраплений пропан-бутан; 5 – метиловий спирт; 6 – етиловий спирт

Рисунок 3.2 – Сумарний викид шкідливих речовин  $M_{66}$  двигуном вантажного автомобіля, що працює на різних паливах з урахуванням викиду бенз(а)пірена

Як видно з даних табл. 3.2, визначальною дуже небезпечною шкідливою речовиною є бенз(а)пірен (становить частку 98% у загальному приведенному викиді ШР –  $M_{66}^{nn}$ ).

Приведені на рис. 3.1 та 3.2 та у табл. 3.1 та 3.2 дані переконливо показують, що роботи, що проводяться зі зниження викиду шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобілів та двигунів, істотно залежать від застосовуваного палива (енергоносія) та успіхи, що досягаються у вирішенні проблеми охорони повітряного басейну міст, повинні бути під постійною увагою та об'єктивним контролем за складом відпрацьованих газів, у тому числі і з обов'язковою оцінкою за сумарним викидом ШР з урахуванням їх відносної агресивності –  $M_{66}^{nn}$ , що гарантує об'єктивність одержуваних результатів екологічної безпеки автомобілів.

При переведенні ДВЗ на спирти, синтез-газ і водень значно знижується сумарний викид ШР і частково знижується викид  $CO_2$ , тобто парникові гази (ПГ).

На підставі вищевикладених експериментальних результатів досліджень можна зробити висновок про те, що вирішення екологічних проблем щодо зниження викидів ШР з ВГ автомобілів з ДВЗ, подальше вдосконалення їх конструкції та застосовуваних антитоксичних систем, також дуже істотно залежить і від застосовуваних палив (енергоносіїв).

Таким чином, методика, що розроблена в розділі 2, дозволяє об'єктивно оцінювати відносну екологічну (економічну) ефективність застосування різних методів зниження викидів шкідливих речовин з ВГ автомобілів. Дослідження різних комбінацій цих методів дозволяють прогнозувати ефективність їх застосування в майбутньому, тобто визначати момент, коли застосовувати той чи інший технічний захід або альтернативне паливо економічно та екологічно доцільно при розвитку нових енергоефективних технологій отримання альтернативних палив (енергоносіїв).

### 3.2 Розрахункові дослідження екологічної безпеки та енергоефективності різних ДВЗ та нових комбінованих енергетичних установок (КЕУ)

Для автомобілебудівників до теперішнього часу та в найближчому майбутньому залишається питання проблеми вибору на перспективу силової установки для автомобілів, яка б забезпечила заміну існуючих традиційних бензинових та дизельних двигунів з метою підвищення екологічної безпеки автомобілів та насамперед щодо викиду ШР.

Для розрахунків застосовано математичну модель матеріальних та енергетичних потоків у ЖЦ силової установки автомобіля. Модель на основі законів збереження маси та енергії описує 12 одиничних процесів, об'єднаних у три основні стадії життєвого циклу: виробництво, експлуатація та переробка. Модель та розроблена на її основі комп'ютерна програма «CarLCA 2.5» дозволила провести оцінку витрати природних ресурсів, енергії та викидів шкідливих речовин, а також екологічних збитків від забруднення навколишнього середовища для одиничних процесів,

окремих стадій та повного життєвого циклу автомобілів з різними силовими установками[2, 3].

Створення нових екологічніших силових установок для автомобілів вимагає розробки нових конструкцій двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Перспективи створення таких силових установок пов'язують із застосуванням комбінованих енергетичних установок (КЕУ) та використання альтернативних видів палив, а також з подальшим удосконаленням систем нейтралізації відпрацьованих газів та створення систем нового покоління.

У період 2010-2012 років розглядалися та досліджувалися для реалізації у виробництві різні варіанти конструкцій КЕУ для перспективних автомобілів. Одним з основних критеріїв вибору КЕУ для автомобілів поряд з комфортабельністю та конструктивною безпекою обов'язково мають бути враховані екологічні та енергетичні показники автомобілів у їхньому ЖЦ.

Для дослідження було піддано розгляду найбільш перспективні та поширені у виробництві типи комбінованих силових установок: традиційна (бензинова); комбінована із послідовною схемою включення силових елементів; комбінована з паралельною схемою включення силових елементів.

Метою цього аналізу було порівняння еколого-економічних показників різних типів силових установок у повному життєвому циклі. Аналізу було піддано чотири варіанти типів комбінованих силових установок, умовно названих: традиційна, паралельна, послідовна та оптимізована паралельна.

Показники силових установок досліджувалися відносно п'ятимісцевого легкового автомобіля з переднім приводом, з масою кузова в комплекті з трансмісією та ходовою частиною 720 кг. Коефіцієнт аеродинамічного опору автомобіля був прийнятий 0,335, лобова площа – 2,0 м<sup>2</sup>, радіус кочення коліс – 0,282 м. Пробіг за повний життєвий цикл автомобіля був прийнятий на рівні 200000 км. На основі попередніх

розрахунків та аналізу вибрано характеристики компонентів силових установок таким чином, щоб автомобілі розвивали максимальну швидкість не менше 150 км/год і час розгону до 100 км/год складав не більше 14 с.

*Традиційна силова установка* включає двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) з іскровим запаленням і розподіленим упорскуванням, в комплексі з системами охолодження, запуску, впускною і випускною системами, а також трикомпонентним каталітичним нейтралізатором. Номінальна потужність ДВЗ становить 58 кВт.

Автомобіль із цією силовою установкою задовольняв норми Євро 3 щодо викидів ШР, що нормуються.

*Паралельна силова установка* включає: ДВЗ з номінальною потужністю 30 кВт і встановленим на колінчастому валу мотор-генератором з постійними магнітами потужністю 14 кВт, комплект з 50 нікель-металогідридних акумуляторних батарей, кожна з яких має ємність 6,5 А·год і напругу в 7,2 В. Силова установка обладнана системами охолодження, впуску, випуску, а також нейтралізації відпрацьованих газів і задовольняла вимогам норм Євро 3.

*Послідовна силова установка* включає: ДВЗ з номінальною потужністю 15 кВт і встановленим на колінчастому валу електричним генератором номінальною потужністю 35 кВт, комплект зі 100 нікель-металогідридних акумуляторних батарей, кожна з яких має ємність 6,5 А·год і напругу 7,2 В, із постійними магнітами номінальною потужністю 49 кВт. Автомобіль із такою силовою установкою задовольняв вимоги норм Євро 3.

Необхідно відзначити, що в якості базового ДВЗ для традиційної силової установки прийнятий чотирициліндровий двигун з робочим об'ємом 1,7 л. Показники ДВЗ інших типів силових установок перераховувалися наступним чином. Приймалося, що частоти обертання колінчастого валу, при яких досягаються, відповідно, номінальний крутний момент і номінальна потужність, у всіх двигунів однакові. Також було

прийнято, що питомі витрати палива та викиди шкідливих речовин у всіх двигунів однакові за даної частоти обертання та величини навантаження, вираженої у відсотках від номінальної. Таким чином, змінюючи величину номінального навантаження (так щоб забезпечити необхідну номінальну потужність), перераховувалися величини витрати палива і викидів для кожного режиму роботи двигуна в полі багатопараметричної характеристики ДВЗ.

Іншими словами, проводилося масштабування показників базового ДВЗ для кожного типу силової установки, тобто двигуни не були спеціально оптимізовані до роботи у складі комбінованих силових установок.

Для того, щоб повною мірою оцінити переваги використання комбінованих енергетичних установок (КЕУ) до розгляду був включений четвертий варіант силової установки, який умовно названий «оптимізована паралельна» і забезпечує витрату палива на рівні 4,1 л/100 км.

Показники різних типів силових установок розраховувалися за методикою оцінки екологічної безпеки різних енергетичних установок за повним життєвим циклом, що викладена у розділі 2. Для проведення розрахунків використовувався європейський їздовий цикл, відповідно до вимог Правил 83-04 ООН. Витрати палива та викиди шкідливих речовин наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Витрата палива та викиди ШР з ВГ при роботі автомобіля на різних типах силових установок під час випробувань за Правилами №83-04 ООН

Показник	Од. вимірювання	Традиційна	Паралельна	Послідовна	Оптимізована паралельна
Витрата палива	л/100 км	6,8	5,31	5,28	4,13
$CH$	г/км	0,277	0,161	0,102	0,1
$CO$	г/км	1,265	0,715	0,417	1,0
$NO_x$	г/км	0,12	0,127	0,124	0,08
$CO_2$	г/км	138,72	108,324	107,712	84,191
$SO_2$	г/км	0,102	0,079	0,079	0,062

Викиди шкідливих речовин у атмосферу за повний життєвий цикл різних типів силових установок наведено на рис. 3.3.

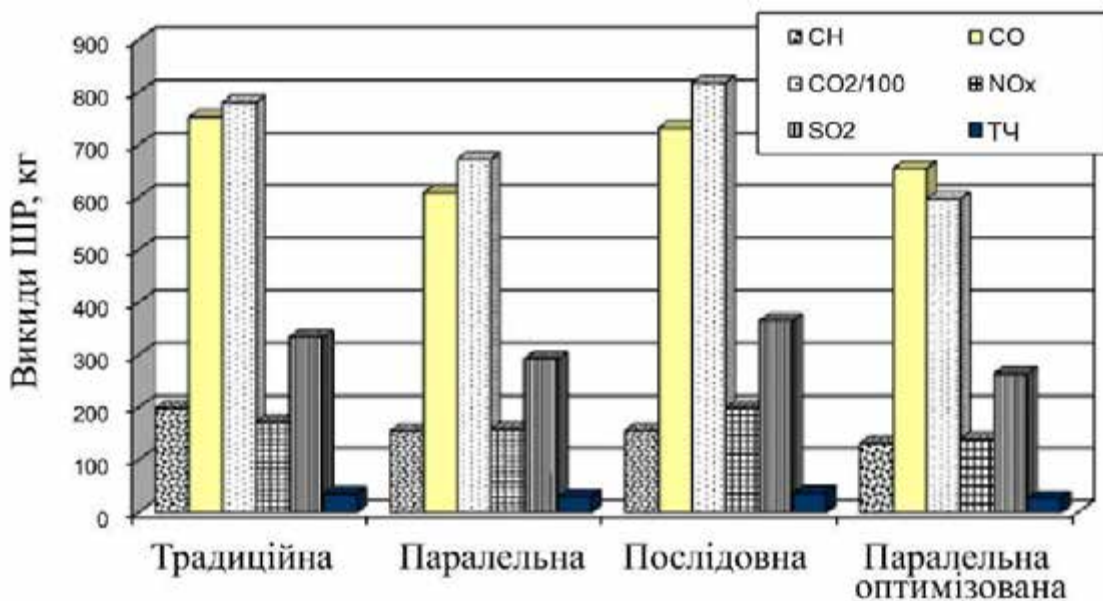


Рисунок 3.3 – Викиди ШП та парникових газів в атмосферу в повному життєвому циклі автомобілів з різними типами силових установок

Необхідно відзначити, що застосування паралельної силової установки знижує сумарний викид ШП на 16%, а оптимізованої паралельної – на 20% у порівнянні з традиційною. Послідовна схема, незважаючи на меншу витрату палива, має на 1,5% більші сумарні викиди у порівнянні з традиційною схемою, що пов'язано з великими викидами на стадії виробництва (через застосування великої кількості кольорових металів (міді та нікелю)).

Результати оцінки збитків від викиду шкідливих речовин в атмосферу за повний життєвий цикл показують, що, в порівнянні з традиційною схемою, застосування паралельної дозволяє знизити екологічні збитки на 11%, послідовної на 4%, а оптимізованої паралельної – на 26%.

Аналізуючи отримані результати необхідно зазначити, що:

- паралельна схема забезпечує кращі показники порівняно з послідовною оскільки використовує електричні машини меншої потужності та акумуляторні батареї меншої ємності, що відбивається на витраті сировини, енергії та викидах ШП на стадії виробництва;

– при переході на використання комбінованих схем конструкція первинного перетворювача енергії – двигуна внутрішнього згоряння – повинна зазнавати суттєвих змін з метою її оптимізації під умови роботи у складі комбінованої силової установки як за економічністю, так і за екологічними показниками; тільки в цьому випадку можливе досягнення найкращих результатів;

– якщо проводити оптимізацію силової установки для умов роботи тільки у міському циклі, можливо отримати більш значне зниження витрат палива та викидів шкідливих речовин.

Отже, дослідження ЖЦ комбінованих силових установок у порівнянні з традиційними показали, що в залежності від схеми, що застосовується (паралельної або послідовної), можливо скоротити витрату палива на 20...38%, а екологічні збитки, що завдаються навколишньому середовищу – на 11...26% по відношенню до базового автомобіля з бензиновим ДВЗ.

3.3 Еколого-економічний аналіз потенційних екологічних переваг та недоліків виробництва та експлуатації електромобілів

Європейська Комісія (ЄС) у 2011 році опублікувала документ щодо транспортної політики ЄС у майбутньому. Він передбачав 50-відсоткове скорочення використання автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на територіях міст до 2030 року та повну їхню заборону до 2050 року, що природно вплине на більш інтенсивний розвиток нових автомобілів з КЕУ та електромобілів [3, 4, 5]. Однак великі обсяги виробництва електромобілів вимагають великої кількості споживаної енергії та розвитку інфраструктури її розміщення з доцільністю споживання її в нічний час. Важливим питанням є вартість отримання електроенергії від різних джерел.

З аналізу літератури видно колосальна різниця в 32...18 разів у витратах (вартості) на створення цих енергоустановок з отримання електроенергії та майже близької собівартості (крім ГЕС) отримання 1 кВт. Однак АЕС та ГЕС за своїх колосальних витрат на будівництво не витрачають традиційних нафтових палив, що і зумовлює їх перспективність.

При розв'язанні завдань щодо створення та забезпечення ефективної експлуатації автотранспортних засобів нового покоління (автомобілі з різними КЕУ або електромобілі) насамперед необхідно виходити з їхнього призначення, тобто з основних видів транспортних та технологічних послуг, для забезпечення яких цей конкретний транспортний засіб призначається. Укрупнено, автомобілі нового екологічного та енергоефективного покоління, в якості основних сфер використання насамперед у мегаполісах та великих містах можна класифікувати за специфікою їх експлуатації:

1. Громадський транспорт (таксі, автобуси, маршрутні таксі);
2. Медичний транспорт та транспорт у системі МВС, та у сфері поштового забезпечення та зв'язку;
3. Автотранспортні засоби ремонтно-комунального призначення;
4. Автотранспортні засоби у сфері торгівлі, що працюють у містах;
5. Особистий транспорт (в основному легкові автомобілі та мінівени).

Нині у зв'язку з поетапним запровадженням нових нормативів на викид як шкідливих речовин, так й викид парникових газів –  $CO_2$  – ведуться інтенсивні роботи виробниками автомобільної техніки як із вдосконалення традиційних конструкцій, так і розробки нових конструкцій з комбінованими енергоустановками і електромобілів.

Однак автомобілі з КЕУ та електромобілі мають значне підвищення вартості їх виробництва та експлуатації, що в поточний період обмежує їх швидке поширення на вулицях міст.

Аналіз переваг та недоліком впровадження автомобілів з КЕУ та електромобілів на першому етапі досліджень показав переваги таких автомобілів у міських умовах у частині екології:

– збереження повітряного простору, оскільки навіть з урахуванням забруднень від електростанцій, розташованих поза містом, автомобілі з КЕУ до 30...50%, а електромобілі сьогодні майже на 90% менше викидають з ВГ шкідливих речовин (окису вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів, а також

твердих частинок з канцерогенними властивостями), ніж автомобіль із традиційним ДВЗ, випуску до 2005 року;

- в електромобілях виключається виділення моторних оливок, палива та охолоджувальної рідини, що сприяє охороні ґрунту, ґрунтових вод та зелених насаджень;

- знижується рівень шуму від транспортного засобу.

Використання автомобілів з КЕУ та електромобілів прогнозується переважним і з економічної точки зору:

- скорочується витрата нафтового палива та інших енергетичних витрат під час здійснення транспортних робіт, оскільки ККД автомобіля з ДВЗ становить в різних умовах руху у міському транспортному потоці трохи більше 15%, а електромобіля – 25% й у перспективі може бути вищим, зі збільшенням ефективності джерел струму, електроприводу і зарядних пристроїв [6];

- електромобіль не витрачає енергії на зупинках (на холостому ході) та має можливість рекуперації енергії при гальмуванні;

- заряд джерел струму електромобіля може виконуватися у нічний час, що сприяє рівномірності завантаження промислової електромережі з підвищенням ефективності.

Проте здорожчання під час виробництва ЕМ проти базових легкових автомобілів нині становить щонайменше у 2...3 рази.

Оцінюючи в цілому потенціал можливого зниження вартості автомобілів з КЕУ та електромобілів на основі порівняльного аналізу структури їх ціни та автомобілів з ДВЗ у класі компактного міського транспортного засобу, можна прогнозувати збереження більш ніж подвійної різниці в ціні електромобілів та на 20...30% автомобілів з КЕУ у найближчі 7...10 років з організації серійного їх виробництва [6, 7].

Складнощі впровадження електромобілів пов'язані зі значними первинними капіталовкладеннями на дослідження (особливо, у частині розробки високоефективних енергоджерел і енергоносіїв), створення

конструкцій і освоєння їх виробництва, створення необхідної інфраструктури їх експлуатації.

Аналіз структури витрат на автомобіль з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ) та витрат на електромобіль виявляє основні складові елементи конструкції електромобіля, що призводять до збільшення вартості в даний час – крім електромоторів з кольорових металів, це акумуляторні батареї, що становлять не менше 40...60% від загальної вартості автомобіля [7, 8].

Таким чином для об'єктивної оцінки переваг з екології та енергоефективності електромобілів та автомобілів з КЕУ необхідно здійснювати вирівнювання їх показників за методикою повного життєвого циклу виробу, що враховує витрати на видобуток матеріалів, та отримання палива, витрати на виробництво, витрати на експлуатацію, а також на утилізацію та рециркування. З цією метою для повної оцінки енергоефективності та екологічної безпеки було проведено експериментально-аналітичну оцінку економічних витрат у повному життєвому циклі автомобілів з різними енергетичними установками на різних енергоносіях [8]. Основні результати оцінки подано на рис. 3.4.

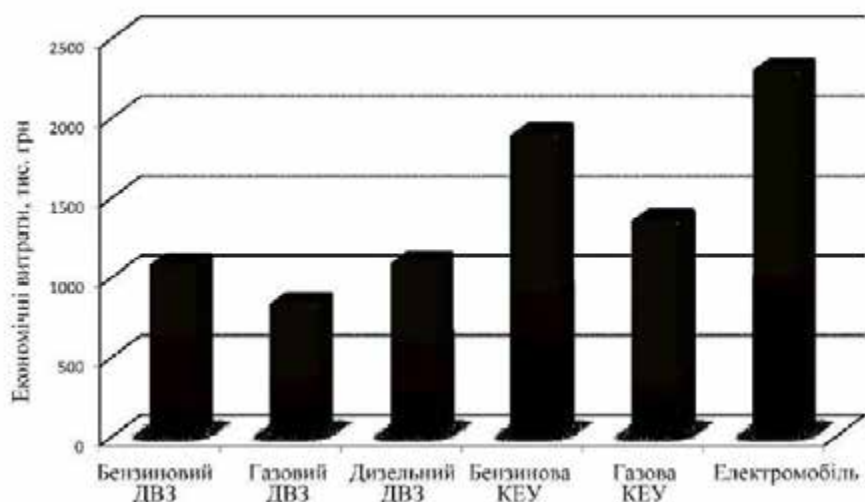


Рисунок 3.4 – Економічні витрати у повному життєвому циклі автомобілів (на прикладі автомобілів «ВАЗ») з різними енергетичними установками на різних енергоносіях

Як показують результати аналізу економічних витрат, у ПЖЦ найменший рівень має автомобіль з ДВЗ, що працює на природному газі, що пояснюється відносно дешевшим паливом при незначному подорожчанні стадії виробництва автомобіля, що використовує газове паливо. Застосування комбінованих енергоустановок призводить до збільшення вартості життєвого циклу автомобіля на 30...60%, що, головним чином пов'язане зі збільшенням вартості виробництва та ремонту таких автомобілів. Найбільш високу вартість повного життєвого циклу має електромобіль, незважаючи на те, що витрати на зарядку енергією у нього в 4 рази менші, ніж у традиційного легкового автомобіля. Проте, вартість його в даний час досить висока і додатково необхідно буде в процесі експлуатації електромобіля замінювати комплект акумуляторних батарей, оскільки вони мають відносно низький ресурс і як зазначалося вище, досить високу вартість.

До цього ж висновку дійшли вчені Норвезького університету науки та технології, які провели порівняльні дослідження показників у життєвому циклі автомобілів з бензиною та дизельною енергетичними установками та електромобілів з різними типами накопичувачів енергії [3]. У дослідженнях вивчався вплив на показники рівня енергоефективності автомобілів та електромобілів, пробігу за життєвий цикл, джерел для отримання електроенергії та ін.

Завдяки проведеному аналізу чутливості показників у життєвому циклі було визначено, що усереднені значення викиду парникових газів за повний життєвий цикл (тобто від видобутку сировини, виготовлення, експлуатації та утилізації) у перерахунку на 1 км пробігу становить для автомобіля з бензиновим ДВЗ – 260 г, з дизелем – 225 г, електромобіля – 200 г. Таким чином, отримані результати у дослідженні (рис. 3.4) та дані Норвезького університету свідчать про те, що застосування електромобілів не є методом істотного зниження викидів парникових газів у планетарному масштабі, отже, і економії енергії (енергоефективності).

## РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Аналіз ефективності використання традиційних та альтернативних палив для зниження викидів парникових газів

При розробці нових та модернізації існуючих силових установок автомобілів з ДВЗ, їх виробники сьогодні орієнтуються на створення модифікацій, здатних працювати на різних традиційних та альтернативних рідких та газоподібних паливах. Існуючі технології виробництва та завдання щодо розширення застосування альтернативних палив для енергетичних установок автомобілів визначаються економічною ефективністю застосування цих палив при оцінці за методикою, викладеною в розділі 2 у повному життєвому циклі від виробництва палива до реального використання в автомобілі з урахуванням коефіцієнта ефективної корисної дії (ККД) ) застосовуваних енергетичних установок.

Так скраплений газ на ДВЗ із примусовим запаленням ефективніший за бензин на 40%. Замінники дизельного палива все менш ефективні: на 13% ДМЕ, на 30% синтетичні палива, на 40% водень через великі витрати енергії на їх виробництво за технологіями, що є сьогодні.

Однак використовувати харчові рослинні продукти для виробництва біопалив недоцільно, по-перше, з гуманних міркувань, коли у світі недоїдають понад 2,5 млн. людей, а по-друге, встановлено, що отримання біопалив із харчових рослин менш ефективно, ніж із целюлози (рис. 4.1). Багато дослідників вважають, що у перспективу слід планувати їхнє масове виробництво з відходів сільськогосподарської діяльності, лісової промисловості тощо [4].

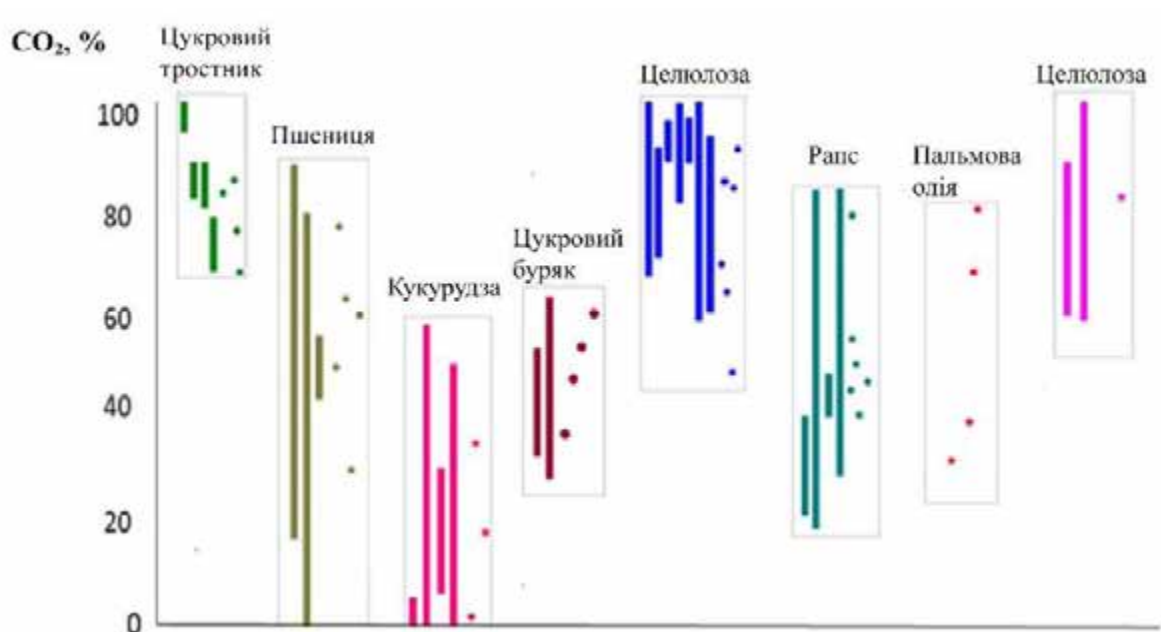


Рисунок 4.1 – Відносна величина зниження викиду  $CO_2$  у повному життєвому циклі з використанням біоетанолу та біодизельного палива

В останнє десятиліття зі збільшенням парку автомобілів інтенсивно наростає небезпечне забруднення атмосфери парниковими газами (вуглекислим газом –  $CO_2$ ), у великих кількостях у відпрацьованих газах автомобілів.

Деякі дослідники очікують на значне зниження викидів  $CO_2$  при заміні традиційних нафтових палив біопаливом, зокрема біодизельним паливом, етанолом та іншими. Характерною особливістю біопалив є те, що сировина для їх виробництва є відновлюваним ресурсом, що заощаджує не поновлювані ресурси. При виробництві палив з рослинної маси значно знижується концентрація  $CO_2$  в атмосфері, оскільки рослини поглинають цей газ для свого зростання, проте при спалюванні біопалив у двигуні внутрішнього згоряння  $CO_2$  у тій же кількості знову потрапляє в атмосферу. При заміні традиційних нафтових палив біопаливами відбувається кругообіг  $CO_2$ , при якому значної шкоди навколишньому середовищу не завдається [3]. На рис. 4.2 подано теоретичний прогноз ефективності зниження викидів  $CO_2$  застосуванням біопалив з різної сировини.



Рисунок 4.2 – Прогноз зниження викидів  $CO_2$  застосуванням різних видів біопалив у повному життєвому циклі

Однак питання про кругообіг  $CO_2$  на рівні 90...95% відносно водоростей, все ж таки викликає певний сумнів.

В роботі [5] наведено світовий прогноз розвитку виробництва енергетичних установок для автотранспортних засобів, згідно з яким до 2025 р. близько 20% (а до 2050 50...60%) вироблених автомобілів будуть з комбінованою енергетичною установкою (КЕУ) на базі двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) або електромобілі, а в перспективі КЕУ на базі електрохімічних генераторів (ЕХГ).

Серйозний перехід на інші відновлювані (сонячна, водно-вітрова енергія) енергоносії, наявний в необмежених обсягах, відбудеться не раніше 2025...2035 років і потрібно бути готовим до цього революційного переходу.

#### 4.2. Розрахунковий аналіз існуючих і прогноз зниження майбутніх викидів парникових газів

У сценаріях боротьби з викидами парникових газів – двоокису вуглецю –  $CO_2$ , першорядна роль (близько 60 %) у зміні клімату відводиться заходам щодо підвищення енергетичної ефективності (ЕЕ) та відновлюваним джерелам енергії (ВДЕ).

Існує широкий міжнародний консенсус щодо того, що енергоефективність і відновлювані джерела енергії можуть відіграти центральну роль у досягненні встановлених цілей боротьби із забрудненням парниковими газами. Це маловитратні варіанти рішень, що покликані забезпечити реалізацію найбільш амбітного сценарію Міжурядової групи експертів зі зміни клімату. Відповідно до цього документа розмір приросту температури повинен бути утриманий на рівні нижче 2,4°C (як видається, це число узгоджується з показником атмосферної концентрації  $CO_2$  в 450 частин). Згідно з цим сценарієм, потрібно скоротити енергетичні викиди, очікувані до 2050 року, на рівні 62 Гт  $CO_2$  до 14 Гт  $CO_2$ , що передбачає дуже значне зменшення обсягу викидів – на 48 Гт  $CO_2$ .

Для порівняння слід зазначити, що в даний період світовий парк автотранспортних засобів складає вже понад 900 мільйонів одиниць і при річному середньому пробігу в 20 тис км і усередненому умовному викиді  $CO_2$  на рівні 500 г/км загальний викид  $CO_2$  вже становить 8,0 млрд. тон (8,0 Гт  $CO_2$ ), тобто приблизно 13% від загального викиду  $CO_2$  у повітря.

Дані про середній викид  $CO_2$  під час руху автомобілів у г/км були отримані на основі аналізу результатів досліджень за методикою повного життєвого циклу виробу. В [10] наведено розрахункові валові викиди парникових газів  $CO_2$  від колісних транспортних засобів у 2000, 2005 та 2012 роках та прогноз цих викидів, їх очікувана (прогнозована) зміна у 2030 та 2050 роках, з урахуванням зростання автомобілів протягом найближчих 10...15 років. Отже, заходи, що намічені провідними країнами виробниками автотранспортних засобів, за їх ефективного виконання, забезпечать різке зниження викидів парникових газів рівня лише у 3 Гт на рік, тобто при збільшенні парку більш ніж у 5 разів, викиди приблизно залишаться на рівні 2000 року. На рис 4.3 наведено викиди  $CO_2$  автомобілями до 3,5 тон та норми викиду  $CO_2$  Євросоюзу після 2012 року, а також орієнтовний прогноз, виконаний автором, щодо різкого зменшення викидів від КЕУ та

електромобілів, з деякими результатами щодо викиду  $CO_2$  від вже вироблених автомобілів КЕУ та електромобілями.

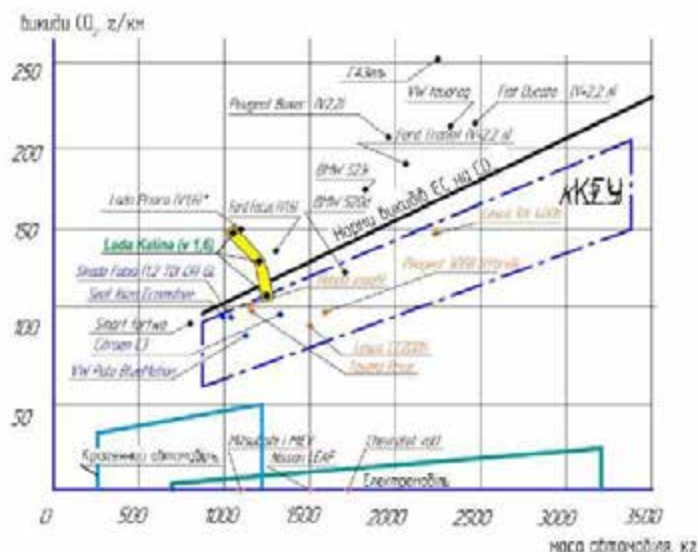


Рисунок 4.3 – Співвідношення норм Євросоюзу на викид  $CO_2$  після 2012 року і реальні викиди легковими автомобілями, що сьогодні виробляються, з КЕУ і електромобілями.

Ці результати підтверджують реальність зниження викидів  $CO_2$  до рівнів 2020 та 2050 років при організації масового виробництва автомобілів з КЕУ та електромобілів для забезпечення щорічного оновлення парку не нижче 10% починаючи з 2020 року.

#### 4.3 Експериментальні дослідження та вибір оптимальних заходів

Підтвердженням реальності вищевикладеного розрахункового прогнозу є виконані експериментальні дослідження та розрахунковий аналіз можливостей підвищення енергоефективності та покращення екологічних показників на прикладі сучасного легкового автомобіля масового виробництва застосуванням нових систем та енергетичних установок та газових палив, які дозволять знизити витрату палива до 2025 року на 35 % та до 2050 року на 80 %.

З метою оцінки можливості зниження викидів ПГ, за допомогою застосування нових технологій з енергозбереження були проведені розрахунково-експериментальні дослідження реальної можливості та

економічної доцільності розробки та створення масового виробництва екологічного автомобіля з найменшим викидом ПГ на прикладі сучасного масового автомобіля.

Витрата бензину автомобілем у змішаному циклі Правил ООН складає 7,2 л/100 км. Оцінка викидів  $CO_2$  провадилася для двох стадій життєвого циклу: витрати на одержання палива (або електроенергії) і витрати на експлуатацію (без урахування стадій виробництва автомобіля та його утилізації). Для порівняння були обрані автомобілі в таких випадках: бензиновий ДВЗ; ДВЗ на газовому паливі; ДВЗ на дизельному паливі; КЕУ на бензині, КЕУ на газовому паливі та електромобіль.

Розрахунково-експериментальні дослідження показали, що газовий ДВЗ забезпечує зниження викиду  $CO_2$  на 29% порівняно з бензиновим ДВЗ і на 5% порівняно з дизельним двигуном. В порівнянні з бензиновим ДВЗ, найбільш переважним в даний час і найбільш ефективним альтернативним паливом є природний газ метан.

Отже, заходи, що здійснюються провідними країнами виробниками автотранспортних засобів, при існуючій конкуренції за ринки збуту своєї продукції здійснюють значні інвестиції у розвиток нових конструкцій та ефективних методів щодо різкого зниження викидів парникових газів своєю продукцією, що має забезпечити до 2050 року зниження викидів  $CO_2$  до рівня 30 г/км, що забезпечить зниження загального викиду парникових газів усім парком планети до рівня не більш ніж 3 Гт на рік. Ця ж цифра загального викиду парникових газів була обчислена аналітичним прогнозом.

## РОЗДІЛ 5 РОЗРАХУНКОВІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як зазначалося в 1 розділі в розділі 1.3 країни Євросоюзу учасники Конвенції ЄЕК ООН «Про транскордонне забруднення повітря» у травні 2012 року прийняли історичні поправки до Протоколу 1999 року «Гетеборгської Конвенції», який вперше включатиме національні граничні рівні для дрібних твердих забруднювачів, концентрація яких у повітрі свідомо перевищує стандарти якості повітря по всій Європі. З цієї причини наприкінці 2012 року ВООЗ вийшла із пропозицією про заборону використання в містах Європи автомобілів, обладнаних дизельними двигунами через викид ними твердих частинок з ВГ.

Нормування викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами автомобільним транспортом міжнародними Правилами ООН ведеться з 1970 року (спочатку Правила ООН № 15 і № 24, потім жорсткіші Правила ООН № 49 і № 83).

У цих правилах спочатку нормувалися викиди сажі, і з 1992 р. – вже твердих частинок.

### 5.1 Аналітичне визначення викиду твердих частинок

У період 2005 – 2006 р.р. екологи дійшли висновку, що зовсім не автомобільні вихлопи, як це було раніше, є основним забруднювачем повітря: до 60% забруднюючих і небезпечних для здоров'я речовин забезпечує стерта в дрібний пил гума автомобільних шин. За рік в одному тільки Києві цієї суспензії викидається у повітря близько 10 тисяч тон (за даними парку автомобілів у 2020 р.).

Кількість виникнення шинного пилу, що з'являється в плямі контакту шини з дорогою при русі автомобіля по дорозі з твердим покриттям, визначається з аналізу конструкції сучасної безкамерної автомобільної шини та висотою її протектора.

Під час руху автомобіля із встановленими серійними шинами по дорогах із твердим покриттям зношується протектор шини.

Пробіг шин, що розглядаються, за час експлуатації становить 80...100 тис.км. За такий пробіг у шини повністю зношується рисунок протектора.

У сучасних автомобільних шин висота малюнка протектора із дорожнім малюнком дорівнює 7,0 – 9,0 мм.

Для зручності визначення факту досягнення граничного зношування малюнка протектора виробники шин ввели в конструкцію шини індикатори зношування.

TWI – Tread wear indicator (індикатор зносу протектора) – знак на боковині шини – показує розташування відміток залишкової висоти малюнка в канавках протектора. Знак наносять по боковині, біля самого протектора рівномірно в шести місцях по колу з кожного боку шини. Мітка може бути або згаданою вище аббревіатурою – TWI, або TWI зі стрілкою, або просто стрілкою без літер.

У всіх країнах, що належать до Європейського співтовариства (ЄЕС) і в Україні потрібно, щоб залишкова висота малюнка протектора шин для легкових автомобілів дорівнювала не менше 1,6 мм з умов безпеки дорожнього руху за критерієм стійкості та керованості.

Довгий час вважалося, що розміри часток продуктів зношування протектора шин досить великі і не можуть завдати шкоди здоров'ю людини. Проте дослідження американських лікарів-алергологів та онкологів, які звернули увагу на підвищену чутливість до алергічних та онкологічних захворювань мешканців будинків, розташованих поблизу автострад у містах, дозволили припустити, що при природному зносі автомобільних шин у повітряне середовище потрапляє значна кількість аерозолі. Ретельно вивчивши його дисперсний склад при аналізі складу повітря на шосе з помірним рухом автотранспорту, дослідники виявили присутність від 3800 до 6900 фрагментів шин у кожному кубічному метрі повітря, більше 58% з них виявилися розміром менше 10 мікрон і, отже, здатні легко проникати в людину, викликаючи бронхіальну астму, алергічні реакції, а при контакті зі слизовою оболонкою та шкірою – риніт, кон'юнктивіт та кропив'янку. До

речі, такий шинний пил із організму людини мало виводиться і, як було зазначено у першому розділі, призводить до летальних результатів [2, 3].

Проведений аналіз різних шин дозволив визначити масу частини шин різного призначення, що зношується.

Проведений аналіз розрахунків показав, що при експлуатації автомобілів в результаті зношування протягом терміну служби шини, в довкілля викидається в середньому: у легкових шин до 1,6 кг – 6,4 кг; у шин легковантажних автомобілів до 3,5 т до 3,8 кг – 22,8 кг; у шин вантажних автомобілів до 15 кг – 120 кг шинного пилу та дрібнодисперсного аерозолі.

Отримані результати дозволили визначити усереднену інтенсивність зносу протектора шин досліджуваних на 1 км пробігу.

Як видно з представленого аналізу викидів шинного пилу при зносі протекторів комплекту шин в г/км значно перевищує (майже в 26 разів) викид твердих частинок з двигуна легкових автомобілів.

Викид твердих частинок внаслідок зносу протекторів комплекту шин на автомобілях до 3,5 тон вже перевищує більш ніж в 60 разів нормативи ЄЕК ООН на викид твердих частинок для двигунів, встановлених на ці автомобілі.

Аналіз за вантажними автомобілями з кількістю шин 6...8 штук перевищує нормативи для ВГ дизелів не менше ніж у 150 разів.

5.2 Розрахункове визначення викиду твердих частинок при зносі гальмівних елементів під час експлуатації автомобілів

Колісні гальмівні механізми різних категорій автотранспортних засобів, що застосовуються, бувають двох типів конструкції: барабанні і дискові.

Все більшого поширення на автомобілях (у тому числі вантажних) набувають дискові гальмівні механізми. Це обумовлено, в першу чергу, їх високою експлуатаційною стабільністю тертя. Однак через меншу площу фрикційних накладок дискового гальма тиск на них більше в 3...4 рази,

механізм відкритий для попадання пилу та бруду. Тому інтенсивність зносу накладок дискового гальмівного механізму більший, ніж у барабанного.

В барабанному гальмі переважна більшість частинок зносу залишається всередині барабана, закритого гальмівним щитом. Через вентиляційні отвори барабана в повітря потрапляють продукти тертя. Обладнання автомобіля антиблокувальною системою призводить до того, що у разі екстрених гальмувань колеса не блокуються і відносно переміщення гальмівних колодок та диска (барабана) зберігається протягом усього процесу гальмування. Це зумовлює збільшення шляху тертя фрикційних елементів гальма, а отже, і інтенсивності їхнього зношування на 10...30%.

На цей час відкриті дискові гальмівні механізми повністю витіснили барабанні на передніх колесах легкових автомобілів і продовжують успішно витісняти їх на задніх.

Фрикційні матеріали – матеріали, що працюють в умовах тертя ковзання, в пристроях гальмування, маючи при цьому високий показник коефіцієнта тертя. Кожен вид транспортних засобів комплектується гальмівними накладками різної товщини та форми. Разом з тим заводи виготовляють гальмівні накладки різних типів практично за однією і тією ж технологією і з однієї сировини з різним співвідношенням компонентів (до складу формувальної суміші входять фенольні смоли, каучуки і металеві включення у вигляді порошків і стружки). Зазвичай, в якості матеріалу для контртіла (під контртілом розуміється гальмівний диск або гальмівний барабан) використовують чавуни, в основному марки СЧ24 ДСТУ 1412-85, твердістю 187-241 НВ. Вочевидь, у такому разі значення коефіцієнта тертя у парі «гальмівна накладка – контртіло» будуть приблизно рівними в гальмівних механізмах різних транспортних засобів.

5.3 Експериментальне визначення дисперсності твердих частинок, що надходять в атмосферне повітря міст при зносі шин та дорожнього полотна

При проведенні додаткових досліджень визначався масовий та кількісний вміст твердих частинок розмірному від 0,3 до 25 мкм з розмірними діапазонами 0,3, 0,5, 1,0, 5,0, 10,0, 25,0 мкм за допомогою лічильника частинок LighthouseHandheld 3016 (США).

Загальний вигляд приладу та інтерфейсу користувача представлений на рис. 5.1.



а



б

а – загальний вигляд лічильника; б – інтерфейс користувача в режимі рахунку частинок

Рисунок 5.1 – Ручний лічильник частинок LighthouseHandheld 3016

Нижче представлені результати дослідження вмісту твердих частинок у повітрі в зоні за ведучими колесами легкового автомобіля, які проводилися під час руху вулицею з дворядним двостороннім рухом.

Типи легкових автомобілів – передньопривідний, задньопривідний.

На автомобілях встановлені шини однакової розмірності 195/65 R15 моделей Bridgestone B650 AQ (на передньопривідному) та «Кама Euro 129» (на задньопривідному). Відбір проб повітря проводився на відстані 5 см за ведучим колесом по ходу руху. Режим добору проб – 10 циклів по 30 сек. з перервою 10 сек. Довжина руху автомобіля – 12 км.

Результати вимірювання вмісту твердих частинок у повітрі під час руху автомобіля в зоні контакту ведучого колеса з дорожнім покриттям представлені на рис. 5.2.

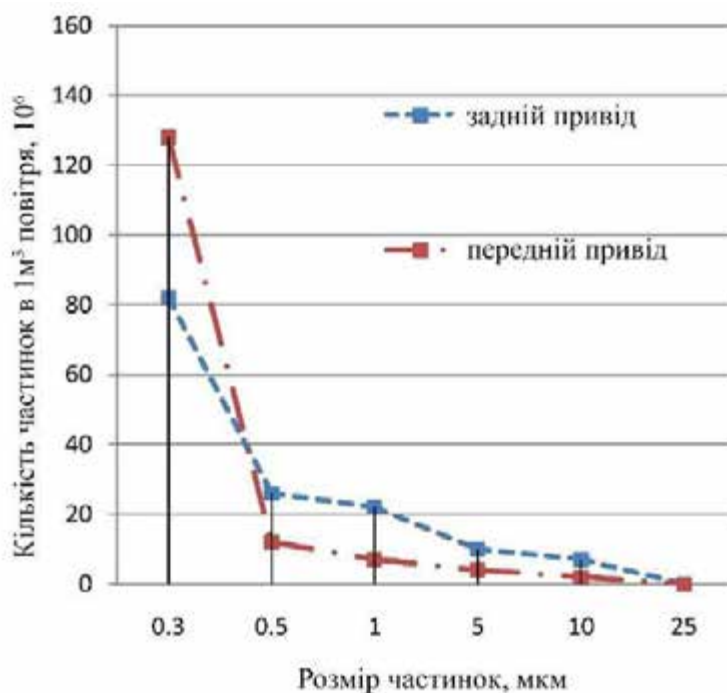


Рисунок 5.2 – Вміст твердих частинок у повітрі під час руху автомобіля у зоні контакту ведучого колеса з дорожнім покриттям

З представлених на рис. 5.2 даних випливає, що основні об'єми твердих частинок повітря в зоні контакту ведучого колеса з дорожнім покриттям знаходяться в діапазоні розмірів від 0 до 1 мкм.

Оцінка впливу продуктів зносу шин та дорожнього полотна, що входять до складу твердих частинок у повітрі над проїжджою частиною доріг, на водіїв та пасажирів у салонах автотранспортних засобів у реальних умовах експлуатації проводилася шляхом вимірювання вмісту твердих частинок у салонах автомобілів та у зовнішньому повітрі.

Зокрема, вимірювання проводились у салоні легкового автомобіля «Фольксваген Пасат Варіант» із системою мікроклімату, обладнаною салонним фільтром MahleLA45 (Німеччина). Порівняльні дані щодо вимірювання вмісту зважених частинок у салоні легкового автомобіля та

дані щодо вмісту зважених частинок у зовнішньому повітрі представлені на рис. 5.3.

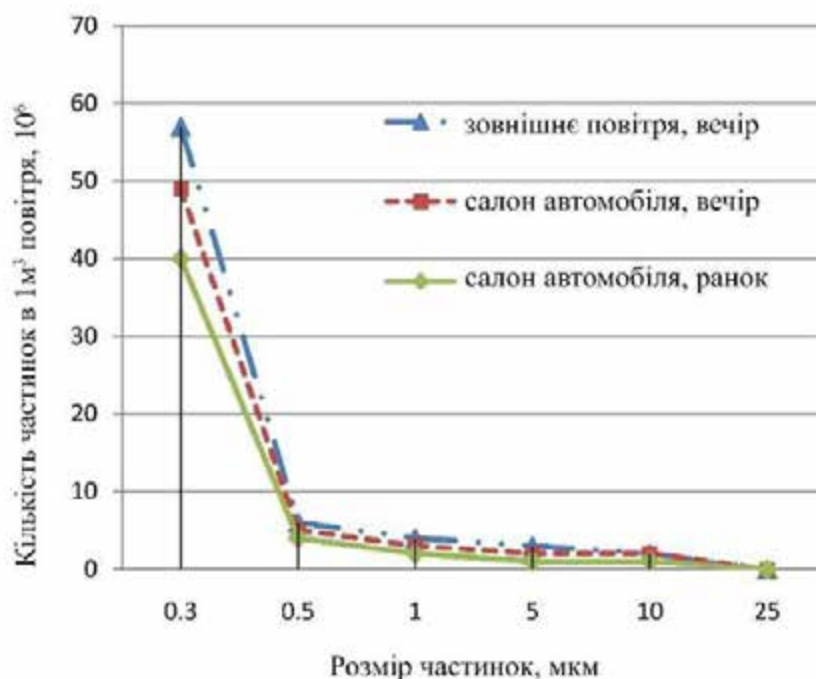


Рисунок 5.3 – Вміст твердих частинок у зовнішньому повітрі та салоні автомобіля під час руху у міських умовах (у щільному транспортному потоці)

У процесі експлуатації внаслідок виділення твердих частинок з відпрацьованими газами автомобілів, виділення продуктів зносу шин, дорожнього полотна, фонового забруднення повітря та інших процесів у повітрі над проїзною частиною доріг формуються підвищені концентрації твердих частинок. Вміст продуктів зношування шин у повітрі над проїжджою частиною доріг становить до 60% від загальної кількості твердих частинок, причому основну їхню частку в повітрі становлять частинки розміром до 1 мкм.

Внаслідок відсутності нормативних вимог до ефективності очищення повітря від твердих частинок у салонах автомобілів, недостатньої тонкості очищення твердих частинок за допомогою салонних фільтрів, їх вміст, особливо розміром до 1 мкм, у повітрі салонів у реальних умовах експлуатації практично такий самий, як і у зовнішньому повітрі. В результаті в щільних транспортних потоках, автомобільних пробках,

тунелях, кар'єрах і т.д. їх вміст в повітрі салонів автотранспортних засобів часто перевищує гігієнічні стандарти (ДСТУ 51206-2004).

Додатково було проведено також оцінку токсичних властивостей матеріалів шин та дорожнього покриття, продуктами зносу яких дихає населення та, в першу чергу, водії та пасажери автотранспортних засобів.

В результаті таких досліджень встановлено, що матеріали нових та вживаних шин, а також дорожніх покриттів є потенційно біологічно небезпечними за критерієм виживання лабораторних тварин (білих мишей) та за прийнятою в Україні методикою оцінки індексу сумарної токсичності не відповідають встановленим гігієнічним вимогам [5].

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану робіт зі зниження екологічних збитків від викидів ШР і парникових газів показав на наявні труднощі об'єктивної оцінки ефективності екологічних та економічних результатів (за збитками) при порівнянні існуючих та нових конструкцій автомобілів з різними силовими установками, що працюють на різних енергоносіях.

2. Розроблена методика оцінки екологічної небезпеки автомобілів на базі сумарного показника викидів ШР з урахуванням їх відносної агресивності дозволяє об'єктивно порівняти різні конструктивні нововведення (заходи) щодо їх екологічної ефективності.

3. Вибраний комплекс математичних моделей та методика розрахунку для оцінки екологічних та економічних показників автомобілів з традиційними ДВЗ, з КЕУ та ЕМ у їх повному життєвому циклі за запобіганими екологічним збиткам дозволяє визначити економічно доцільні напрями розвитку конструкцій на найближчу та віддалену перспективу.

4. Виконані комплексні теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють визначити економічну ефективність запланованих заходів щодо зниження викидів ШР та ВГ, при розробці та впровадженні різних конструкцій автомобілів виробниками на найближчу перспективу до 2050 року відповідно до перспективних вимог міжнародних Правил ООН.

5. Проведені теоретичні оцінки економічної ефективності різних запланованих заходів світовими виробниками автомобілів для забезпечення виконання перспективних норм на викид  $CO_2$  на майбутні періоди 2030 та 2050 років дозволили підтвердити реальність зменшення викиду ПГ світовим парком автотранспорту до 2050 року до рівня 2005 р.

6. Вперше у світовій практиці проведено порівняльну оцінку викиду твердих частинок з ВГ автомобілів та викиду твердих частинок від зносу шин, викид якої перевищує у 25...150 разів норми Євро 6, передбачені міжнародними Правилами ООН викидів твердих частинок з ВГ автомобілів,

що вказує на необ'єктивність та помилковість вимог, висунутих у 2012 року Всесвітньою організацією охорони здоров'я щодо подальших посилень нормативів на викид ТЧ, аж до заборони використання автомобілів із дизельними двигунами у містах Європи.

7. Розроблено та обґрунтовано основні технічні вимоги до нових систем очищення повітря щодо ефективного зниження вмісту ТЧ та особливо небезпечних шкідливих речовин від зносу шин та дорожнього полотна в салонах автомобілів для забезпечення екологічної безпеки людини всередині автомобіля, особливо на магістралях великих міст.

## СПИСОК ВИРОСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hasibuan, Hayati Sari, Tresna P. Soemardi, Raldi Koestoer, and Setyo Moersidik. "The role of transit oriented development in constructing urban environment sustainability, the case of Jabodetabek, Indonesia." *Procedia Environmental Sciences* 20 (2014): 622-631.
2. Hasibuan, Hayati S., and Chrisna T. Permana. "Socio-cultural characteristics of people and the shape of transitoriented development (TOD) in Indonesia." *Journal of Transport and Land Use* 15, no. 1 (2022): 295-314.
3. Jasim, Ihsan Abbas, Sabeeh Lafta Farhan, and Haider Majid Hasan. "Ways to activate urban transport to achieve urban sustainability." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1090, no. 1, p. 012034. IOP Publishing, 2021.
4. Lestari, Puji, Maulana Khafid Arrohman, Seny Damayanti, and Zbigniew Klimont. "Emissions and spatial distribution of air pollutants from anthropogenic sources in Jakarta." *Atmospheric Pollution Research* 13, no. 9 (2022): 101521.
5. Hidayatno, Akhmad, Arry Rahmawan Destyanto, and Muhammad Fadhil. "Model conceptualization on e-commerce growth impact to emissions generated from urban logistics transportation: A case study of Jakarta." *Energy Procedia* 156 (2019): 144-148.
6. Vinci, G., F. D'ascenzo, A. Esposito, M. Musarra, M. Rapa, and A. Rocchi. "A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation." *Journal of cleaner production* 223 (2019): 587-595. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* Volume 51, Issue 1 (2025) 211-217
7. Suryawan, I. W. K., A. Rahman, J. Lim, and Q. Helmy. "Environmental impact of municipal wastewater management based on analysis of life cycle assessment in Denpasar City." *Desalination and Water Treatment* 244 (2021): 55-62.
8. Iqbal, Muhammad Noer, Safitri Puji Lestari, Michael Yosafaat, Keke Afrilia Mardianta, Iva Yenis Septiariva, and I. Wayan Koko Suryawan. "Life

cycle assessment approach to evaluation of environmental impact batik industry." *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan* 5, no. 2 (2021): 194-201.

9. Chairani, Rika, Aulia Risky Adinda, Dennis Fillipi, Muhamad Jatmoko, and I. Suryawan. "Environmental Impact Analysis in the Cement Industry with Life Cycle Assessment Approach." (2021). 139-146

10. Rahmalia, Intan, Syifa Khairun Nisa, Vita Palupi, Aninda Putri, and I. Wayan Koko Suryawan. "A study of the tofu industry environmental impact condition and scenario treatment using life cycle assessment approach." *EPI International Journal of Engineering* 4, no. 1 (2021): 7-13.

11. Priadmaja, Adji Prama, and Anisa Anisa. "Penerapan konsep transit oriented development (TOD) pada penataan kawasan di Kota Tangerang." *PURWARUPA Jurnal Arsitektur* 1, no. 2 (2018): 53-60.

12. Departemen Perhubungan Direktorat Jenderal Perhubungan Darat, Pedoman Teknis Penyelenggaraan Angkutan, Penumpang Umum Di Wilayah Perkotaan Dalam Trayek Tetap Dan Teratur. DKI Jakarta: Departemen Perhubungan, 2001.

13. Noviarini, Chairunnisa, Ari Rahman, I. Wayan Koko Suryawan, Iva Yenis Septiariva, and Sapta Suhardono. "Global warming potential from public transportation activities during covid-19 pandemic in Jakarta, Indonesia." *International Journal of Safety and Security Engineering* (2022): 223-227.

14. T. Kurniati and J. Nobel Valentino, "A study on the use of public transportation during the COVID-19 pandemic," *E3S Web Conf.*, vol. 331, 2021, [Online].

15. Yildizhan, Fatih. "A new perspective on public transportation systems investments after the COVID-19 pandemic effect: Bus rapid transit (BRT) for the metropolis, small & medium-scale cities." *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 28, no. 3 (2022): 363-371.

16. Ghate, Akshima Tejas, and Sharif Qamar. "A life cycle analysis of urban public transport systems in Indian cities." *Case Studies on Transport Policy* 8, no. 1 (2020).

17.Ghate, Akshima Tejas, and Sharif Qamar. "Carbon footprint of urban public transport systems in Indian cities." *Case Studies on Transport Policy* 8, no. 1 (2020): 245-251.

18.M. A. Hapsari, "Jumlah Penumpang Bus Transjakarta Turun Drastis Sejak Pandemi, Dulu 1 Juta Kini 150.000 Per Hari," 2021. <https://megapolitan.kompas.com/read/2021/08/02/20194291/jumlah-penumpang-bus-transjakarta-turun-drastis-sejak-pandemi-dulu-1-juta>

19.F. Bella, A. García, F. Solves, and M.A. Romero, "TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM Paper revised from original submittal," *Transp. Res. Rec.*, no. November, pp. 1–19, 2007.

20.Dyr, Tadeusz, Przemysław Misiurski, and Karolina Ziółkowska. "Costs and benefits of using buses fuelled by natural gas in public transport." *Journal of Cleaner Production* 225 (2019): 1134-1146.

21.Kwan, Soo Chen, Marko Tainio, James Woodcock, Rosnah Sutan, and Jamal Hisham Hashim. "The carbon savings and health co-benefits from the introduction of mass rapid transit system in Greater Kuala Lumpur, Malaysia." *Journal of Transport & Health* 6 (2017): 187-200.

## ДОДАТКИ