

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»  
(назва факультету)

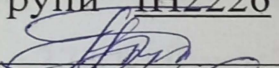
«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
ОС «МАГІСТР»

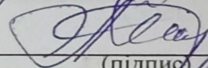
Тема: "Ефективність заходів щодо скорочення шкідливих викидів рухомого складу залізниць"

за освітньою програмою «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

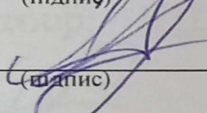
зі спеціальності: 273 Залізничний транспорт  
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи ІН2226  
  
(підпис студента)

/ Артур ГРАБАРЧУК /  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

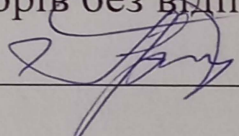
Керівник:  
  
(підпис)

/ доцент Лілія СОЛОДЯК /  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:  
  
(підпис)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /  
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент  
  
(підпис)

Дніпро – 2024 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine**  
**Ukrainian State University of Science and Technologies**

Building, architecture and infrastructure

---

(faculty)

Transport infrastructure

---

(department)

**Explanatory Note**  
**to Master's Thesis**

**Master**

(higher education degree)

on the topic: EFFICIENCY OF MEASURES TO REDUCE HARMFUL  
EMISSIONS FROM RAILWAY ROLLING STOCK

according to educational curriculum Interoperability and safety in railway transport

in the Specialization: 273 Railway Transport

---

(Specialization and its code)

Done by the student of the group: IH2226 / Artur HRABARCHUK /

---

(name, surname)

Scientific Supervisor: / Docent Lilia SOLODYAK /

---

(position, name, surname)

Normative controller: / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /

---

(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

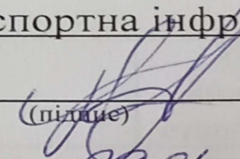
Освітня програма: «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
«Транспортна інфраструктура»

  
Олексій ТЮТКІН  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 29.04.2023

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Грабарчуку Артуру Артуровичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Ефективність заходів щодо скорочення шкідливих викидів рухомого складу залізниць»

Керівник роботи: Солодяк Лілія Йосипівна, к.т.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від «26» квітня 2023 р. № 360ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Методи екологізації роботи дизельних двигунів тепловозів, аналіз чинної методики нарахування екологічного податку в Україні, методики розрахунку еколого-економічних збитків; європейські нормати регуляторні акти у сфері охорони довкілля; економічні інструменти управління природоохоронній сфері та інші

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ. Розділ 1. Проблема негативного впливу рухомого складу залізниць на навколишнє середовище. Розділ 2. Процеси спалювання палива та перетворення шкідливих викидів у атмосферному повітрі. Розділ 3. Оцінка впливу викидів дизельних двигунів на здоров'я людини та довкілля. Розділ 4. Аналіз сучасних перспектив екологізації двигунів локомотивів. Висновки.

Перелік графічного матеріалу: Презентація за матеріалами досліджень, складених в магістерській роботі (PowerPoint, 10...12 слайдів).

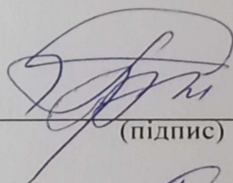
6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проблема негативного впливу рухомого складу залізниць на навколишнє середовище	30.10.2023-19.11.2023	
2	Процеси спалюванні палива та перетворення шкідливих викидів у атмосферному повітрі	20.11.2023-4.12.2023	
3	Оцінка впливу викидів від дизельних двигунів на здоров'я людини та довкілля	5.12.2023-17.12.2023	
4	Аналіз сучасних перспектив екологізації двигунів локомотивів висновки. Оформлення ВКР.	18.12.2023-07.01.2024	
5	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	08.01.2024-14.01.2024	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2024	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	Згідно з планом ЕК	

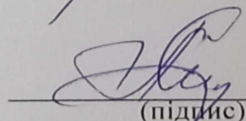
Студент



(підпис)

Артур ГРАБАРЧУК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи



(підпис)

Лілія СОЛОДЯК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## **РЕФЕРАТ**

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: складається з вступу, чотирьох розділів і висновків. Робота включає 9 рисунків і 3 таблиці. Загальний обсяг роботи 68 сторінок. Кількість використаних джерел в бібліографії – 33.

Об'єктом дослідження даної дипломної магістерської роботи є експлуатаційні процеси дизельних двигунів тепловозів і методи мінімізації токсичних викидів при різних режимах роботи.

Мета роботи полягає в дослідженні проблемних питань щодо екологізації роботи дизельних двигунів тепловозів.

У даній магістерській роботі проведено оцінку сучасного стану питання контролю якості роботи ДВЗ тепловозів. Проведено детальний аналіз теоретичних та практичних досліджень у галузі підвищення екологічності експлуатації тепловозних дизелів. Зроблено висновки.

**Ключові слова: ДИЗЕЛЬНІ ДВИГУНИ, ТЕПЛОВОЗИ, РЕЖИМИ РОБОТИ, ШКІДЛИВІ ВИКИДИ, ЕКОЛОГІЗАЦІЯ**

## **ABSTRACT**

The master's thesis consists of an introduction, four chapters and conclusions. The work includes 9 figures and 3 tables. The total volume of work is 67 pages. The number of used sources in the bibliography is 27.

The object of research of this diploma master's thesis is the operational processes of diesel engines of diesel locomotives and methods of minimizing toxic emissions in different modes of operation.

The purpose of the work is to investigate problematic issues related to the environmental protection of the operation of diesel engines of diesel locomotives.

In this master's thesis, an assessment of the current state of the issue of quality control of the operation of internal combustion engines of diesel locomotives was carried out. A detailed analysis of theoretical and practical research in the field of improving the environmental friendliness of the operation of diesel locomotives has been carried out. Conclusions have been made.

**Key words: DIESEL ENGINES, LOCOMOTIVES, OPERATING MODES, HARMFUL EMISSIONS, ENVIRONMENTAL PROTECTION**

## ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	9
1. ПРОБЛЕМА НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ НА НАВКОЛИШНЄ СРЕОДОВИЩЕ .....	11
1.1. Аналіз методів еколого-економічного регулювання впливу залізничного транспорту на атмосферу	11
1.2. Сучасний європейський досвід у сфері екологічного контролю експлуатаційного процесу	12
1.3 Специфіка експлуатації тепловозних двигунів	16
2. ПРОЦЕСИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ У АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ.....	24
2.1. Специфіка процесів, що відбуваються у паливній апаратурі дизеля	26
2.2. Методи визначення валових викидів при спалюванні палива	30
2.3. Принципи удосконалення методики визначення кількості шкідливих викидів транспортними ДВЗ у навколишнє середовище	33
3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИКИДІВ ВІД ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ ТА ДОВКІЛЛЯ.....	36
3.1. Основні забруднювачі атмосферного повітря при спалюванні рідкого палива	37
3.2. Методи нормування та оцінка впливу викидів	39

4. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПЕРСПЕКТИВ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ.....	43
4.1. Технічні підходи до вирішення екологічних проблем дизельних двигунів	43
4.2. Технології використання альтернативних палив	51
4.3. Експлуатаційні заходи, що знижують шкідливі викиди	57
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ.....	66
СПИСОК РИСУНКІВ.....	70
СПИСОК ТАБЛИЦЬ.....	71

## ВСТУП

В останні роки серйозне занепокоєння у всьому світі викликає високий рівень техногенного впливу на навколишнє середовище, що створює низку глобальних, регіональних та локальних екологічних проблем – зміну клімату планети, забруднення повітряного басейну великих міст, зростання дефіциту нафтових ресурсів.

Основним техногенним джерелом виділення шкідливих речовин в атмосферу є процеси згоряння різних видів палива, які відповідають за викиди наступних шкідливих речовин: оксид вуглецю, діоксид вуглецю, вуглеводні, що не згоріли, в тому числі канцерогенні, оксиди азоту, діоксид сірки, дисперсні частинки.

Важливу роль забруднення атмосфери шкідливими речовинами грають транспортні засоби, зокрема з дизельними двигунами. У світовому енергетичному балансі перше місце вироблення потужності стоять двигуни внутрішнього згоряння транспортних і транспортно-технологічних машин. Токсична дія відпрацьованих газів цих двигунів на здоров'я людей та навколишнє середовище визначається в основному вмістом оксидів азоту та дисперсних частинок.

Велику шкоду навколишньому середовищу завдають відпрацьовані гази дизелів, які містять сажа і компоненти неповного згоряння палива. Все гострішою стає проблема - зниження шкідливих викидів з відпрацьованими газами енергоустановок. Окрім інших несприятливих показників якості обтяжених та важких палив слід зазначити підвищений вміст у них сірки. Це означає, що у складі відпрацьованих газів значно підвищується вміст сірчаного і сірчистого ангідриду, тобто потенційних кислотовмісних продуктів, вплив яких різко негативно позначається на довкіллі [1, 3, 7, 8].

Екологічні стандарти, ринок та необхідність економії палива висувають величезні вимоги до дизельного двигуна [1, 2, 6 - 8]. Виконання перспективних екологічних стандартів вимагає розробки та впровадження двигуна, що забезпечує дуже низькі шкідливі викиди CO<sub>2</sub> та майже нульові викиди NO<sub>x</sub> та

дисперсних частинок при збереженні чи покращенні інших експлуатаційних показників. Прогрес щодо забезпечення перспективних екологічних стандартів потребує розробки:

- ефективних екологічно досконалих двигунів, які використовують нові технології;

- ефективних систем нейтралізації відпрацьованих газів;

- наявності палив із ультранизким вмістом сірки.

Найбільший вплив на екологічні та паливо-економічні показники двигуна надає паливна апаратура. За даними роботи [1] ступінь впливу паливної апаратури на токсичність газів, що відпрацювали, становить 35%.

Це пояснюється тим, що основна маса токсичних компонентів газів, що відпрацювали, є продуктами горіння паливо-повітряної суміші. У той же час характер протікання процесу горіння визначається якістю процесу паливоподачі, розпилювання і сумішоутворення. Вирішення проблеми зниження токсичності газів, що відпрацювали, досягається оптимізацією величини коефіцієнта надлишку повітря на кожному навантажувальному і швидкісному режимах роботи дизеля, підвищенням тиску впорскування палива, поліпшенням якості розпилу палива.

Кожен із перелічених напрямів має свої переваги та недоліки і не дає однозначних позитивних рішень у галузі зниження токсичності відпрацьованих газів та покращення експлуатаційних характеристик тепловозного двигуна.

## 1. ПРОБЛЕМА НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Ефективне функціонування та послідовний розвиток залізничного транспорту має принципове значення для розвитку регіонів, галузей та окремих підприємств, оскільки наявність транспортних потужностей є необхідною умовою розвитку продуктивних сил, особливо в періоди підйому економічної кон'юнктури.

Отже, дані факти визначають необхідність стратегічного управління залізничною галуззю як механізм реалізації довгострокових цілей та завдань, що у свою чергу уможлиблює досягнення більш високих темпів розвитку порівняно із загальноекономічними.

### 1.1. Аналіз методів еколого-економічного регулювання впливу залізничного транспорту на атмосферу

Аналіз існуючих методологічних підходів до зниження негативного впливу викидів від пересувних джерел показав, що з залізничного транспорту в екологічному плані можна використовувати лише вдосконалення та оптимізацію технічних параметрів роботи об'єктів залізничного транспорту [1, 7, 8].. Водночас важелі щодо скорочення екологічних проблем можуть з'явитися у суспільства лише після об'єктивної оцінки природних ресурсів у реальних економічних показниках та їх громадській корисності. При цьому як основа для вироблення методологічних підходів щодо регулювання природоохоронної діяльності повинні виступати методи економічної оцінки власне природних ресурсів, оцінки витрат на розробку та експлуатацію природоохоронних заходів, а також оцінки екологічної шкоди навколишньому природному середовищу та здоров'ю людей, що виникає в процесі природокористування.

Серед існуючих підходів до визначення економічної цінності природних ресурсів можна виділити на основі їх ринкової та рентної оцінки, на

індивідуальних та замикаючих витратах, на альтернативній вартості, на загальній економічній цінності (вартості) та ін. Практично всі ці підходи базуються на оцінці *saïrag* на виявлення, вивчення, освоєння та ефективного застосування природних ресурсів у господарській діяльності з урахуванням їхнього територіального розподілу, раціонального використання та відтворення. Але атмосферне повітря як ресурс зазвичай не розглядається (відсутність кордонів, рухливість, доступність, здатність до самовідновлення тощо) і вартісної оцінки не має, тому що витрати при його споживанні практично відсутні, що зумовлює пріоритет економічної оцінки екологічної шкоди. як основний економічний підхід до організації його раціонального використання.

Особливості залізничного транспорту (стаціонарність мережі, графік руху, режимні параметри тощо) у сукупності з презумпцією його екологічної небезпеки підтверджують постійну наявність економічної шкоди, яку необхідно компенсувати.

Аналіз існуючих методологічних підходів до визначення розмірів платежів на залізничному транспорті показав, що вони не лише не враховують реальних збитків, а й не дозволяють запропонувати шляхи зниження негативного впливу на атмосферне повітря, не стимулюють природоохоронну діяльність.

## 1.2. Сучасний європейський досвід у сфері екологічного контролю експлуатаційного процесу

На частку дизельних залізничних складів припадає менше 2,5% викидів оксиду азоту та 4,5% викидів завислих частинок у сукупному обсязі викидів їхнього транспортного сектору Європи. Європейські залізниці поставили завдання скорочення своїх сукупних викидів NO<sub>x</sub> та ВЧ на 40% до 2030 року[7, 12-14].

За період з 2010 по 2020 рік викиди NO<sub>x</sub> та ВЧ із дизельних залізничних складів скоротилися вже приблизно на 35%. Згідно з розрахунками,

проведеними консорціумом "CleanER-D", є потенціал для подальшого значного скорочення викидів NO<sub>x</sub> більш ніж на 20%) і викидів ВЧ більш ніж на 25% у період з 2015 по 2025 рік [7].

Причини такого суттєвого покращення майбутніх показників у галузі викидів полягають у наступному:

а) впровадження більш екологічних технологій, що застосовуються в двигунах, та встановлення граничних значень (ТВТ, етап ШВ) для європейського парку транспортних засобів;

б) скорочення парку дизельних локомотивів (статистичні дані МСЗ показують, що значна частка дизельних локомотивів у Європі виведена з активної експлуатації) і скорочено пробіг транспортних засобів застарілих конструкцій з великим терміном експлуатації;

с) більш ефективна експлуатація дизельних локомотивів та дизельних складів (ДС);

д) подальша електрифікація залізничних ліній (наприклад, у коридорах ТЕС-Т Європейського Союзу).

Історичні передумови контролю і скорочення викидів від ДВЗ у Європі відбувалися поетапно наступним чином. Сьогодні, вимоги до дизельних двигунів для залізниць регламентуються директивою ЄС 97/68. Друга директива, яка визначає норми рівнів Stage III та Stage IV щодо викидів для двигунів, що встановлюються на технічні засоби залізничного транспорту, була прийнята ще в 2004р. Третя директива, прийнята в 2010р., обумовлює процедури випробувань двигунів на відповідність Stage IV. Дані норми застосовуються як до двигунів тягових одиниць нової розробки, так і до двигунів, які замінюють раніше встановлені на експлуатованих локомотивах, моторвагонних поїздах та суднах, що використовуються на внутрішніх водних коліях.

Норми рівня Stage III, поділені на Stage IIIA та Stage IIIB запроваджувалися поетапно. Для двигунів в діапазоні потужності від 37 до 560кВт норми Stage IIIA діють з 2006 р., норми Stage IIIB - з 2011 р. Для

двигунів потужністю більше 560кВт, які звичайні для більшості локомотивів і деяких типів дизель-поїздів з S2., а норми Stage III з 2012 р. Норми рівня Stage IV, які поширюються на двигуни всіх категорій введено у 2014 р.[4-5, 7].

Фактично в ЄС існують дві дати введення в дію норм на викиди шкідливих речовин для двигунів, які використовуються поза автомобільним транспортом. Перша дата (type approval) встановлює термін, після якого всі двигуни нової, що отримала схвалення розробки, повинні відповідати прийнятим нормам. Друга (market placement) задає термін, після якого все нові двигуни, що з'являються на ринку, повинні відповідати прийнятим нормам.

Зазвичай розрив між двома датами, важливими як постачальників, так споживачів, наближається до року.

За даними статистичних джерел ЄС, на дизельний рухомий склад усіх видів транспорту, крім автомобільного, припадає чверть викидів оксиду азоту та третина твердих частинок діаметром менше 2,5 мкм. Європейські органи мають намір запровадити мінімальні нормативи. За оцінками залізничного сектора, ці норми надто жорсткі, а тимчасові рамки реорганізації виробництва обмежені.

В Америці технічні вимоги ЕРА поширюються на локомотиви з двигунами потужністю понад 750 кВт. Виділяються дві групи: маневрові (до 2300 л. с.) та магістральні (2300 л. с. і більше) тепловози. Норми рівня Tier 3 для нових маневрових тепловозів і всіх магістральних тепловозів. Локомотиви цих двох груп вимагають випробувань різних видів, що відбивають різні вимоги щодо їх експлуатації. Норми Tier 4 для обох груп вступили в 2015 р. Ці норми поширюються на певний термін експлуатації локомотива незалежно від того, коли пройшла перша модернізація [4-5, 7].

У Німеччині частка забруднень та шкідливих викидів, що припадає на тепловозну тягу, у загальних розмірах викидів відносно мала — 2,1 % за окислами азоту та 0,4 % за частинками сажі. Однак на окремих лініях величина питомих викидів тепловозних дизелів у розрахунку на 1 км на рік часто у кілька разів вища, ніж від автомобільних перевезень. Європейськими

директивами щодо якості повітря (RL 96/62 EG), встановлені єдині для всієї Європи нормативи щодо вимірювання та оцінки складу та обсягів шкідливих викидів [4-5]..

Федеральна постанова про захист від забруднень (BIMSchV), яка з цих директив. У ньому дано конкретні гранично допустимі значення та ступені небезпечних забруднень стосовно вмісту оксидів сірки, вуглецю та азоту, а також твердих частинок, озону, бензолу та свинцю. Для транспортної галузі насамперед важливі граничні значення оксидів азоту та частинок сажі.

Постанова BImSchV обумовлює граничні значення та допуски на вміст оксидів азоту та дрібнодисперсного пилу із середнім розміром частинок 10 мкм (PM10).

Зазначені граничні значення є обов'язковими всім транспортних підприємств, і постраждали від перевищення можуть звертатися до суду. За контроль якості повітря та дотримання граничних значень несуть відповідальність федеральні землі. Якщо встановлено перевищення граничних значень забруднення довкілля, у разі відповідно до §47 федерального закону про захист від забруднень (BImSchG) розробляється план, який передбачає заходи щодо забезпечення зниження забруднень. З цією метою можуть бути запропоновані програми допомоги, а також запроваджені відповідні обмеження та заборони. До виконання цих заходів залучаються всі винні з урахуванням їхньої частки у загальному перевищенні забруднень.

Постанова BImSchV та закон BImSchG чітко встановлюють обмеження та заборони на перевезення. Станом на 2022 р. у Німеччині оголошено екологічно чистими 43 зони та заплановано ще дві. Адміністративно-правові рамкові умови передбачають обмеження у таких зонах залізничних перевезень. Залізничні компанії повинні брати участь у роботах щодо покращення ситуації із забрудненнями [7].

Нещодавно було внесено зміни до європейських директив щодо якості повітря RL 97/68 EG; закріплені в них обов'язкові граничні значення шкідливих викидів стосовно нових залізничних дизелів є відповідним

орієнтиром для виробників рухомого складу і побічно стосуються власників, що експлуатують його [7].

*Завдання ДВ із захисту клімату.* Законодавчі норми щодо зниження шкідливих викидів не можна розглядати незалежно одна від одної, оскільки зміни величини викидів оксидів азоту, що утворюються при згорянні палива, знаходяться у зворотній залежності від вмісту CO<sub>2</sub> та ряду інших компонентів у вихлопних газах.

Норма обов'язкового зниження питомих викидів CO<sub>2</sub> у виробничих процесах на ДВ – головне стратегічне завдання концерну. Ці викиди до 2030 р. мають бути знижені на 20 % порівняно з тими, що мали місце у 2020 р. [4-7]. У зв'язку з необхідністю зниження викидів частинок сажі та оксидів азоту зазначена раніше зворотна залежність обумовлює виникнення класичного конфлікту цілей, який може бути вирішений лише шляхом виконання відповідних взаємно узгоджених технічних та експлуатаційних заходів.

Отже, залізниці повинні докладати значних зусиль, щоб у майбутньому в секторі перевезень неелектрифікованими лініями відповідати зростаючим екологічним вимогам.

### 1.3 Специфіка експлуатації тепловозних двигунів

Робота різноманітних технічних засобів залізничного транспорту супроводжується викидами шкідливих речовин. Однак порівняння залізниць з іншими видами транспорту показує, що викиди оксидів азоту та сажі мінімальні (рис. 1.1 – 1.3). Це вирішальною мірою обумовлено незначними викидами при електричній тязі, на якій виконують більше 90% всього обсягу перевезень [7].

За абсолютними значеннями викиди оксидів азоту і сажі постійно знижуються. Стійке тривале зниження шкідливих викидів пояснюється як зменшенням витрати дизельного палива внаслідок зниження обсягу перевезень, що виконуються поїздами на тепловозній тязі (на 65 % порівняно з 1990 р.) [7], і застосуванням тепловозів і дизель-поїздів нового покоління з

сучасними двигунами. Тим не менш, питомі значення шкідливих викидів тепловозної тяги помітно перевищують цей показник електричної тяги.

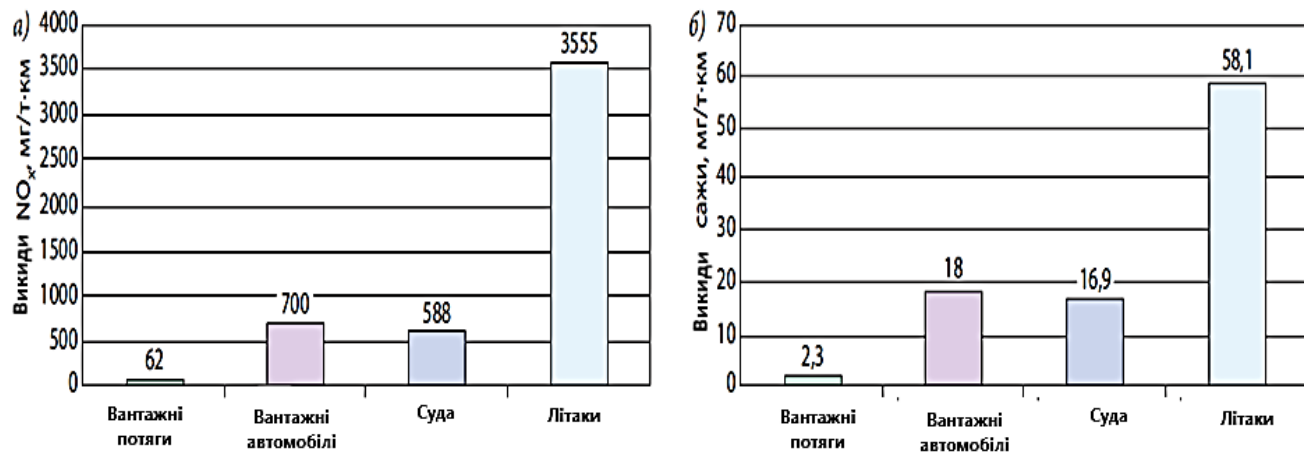


Рисунок 1.1 – Викиди оксидів азоту (а) та сажі (б) від вантажного транспорту в Німеччині.

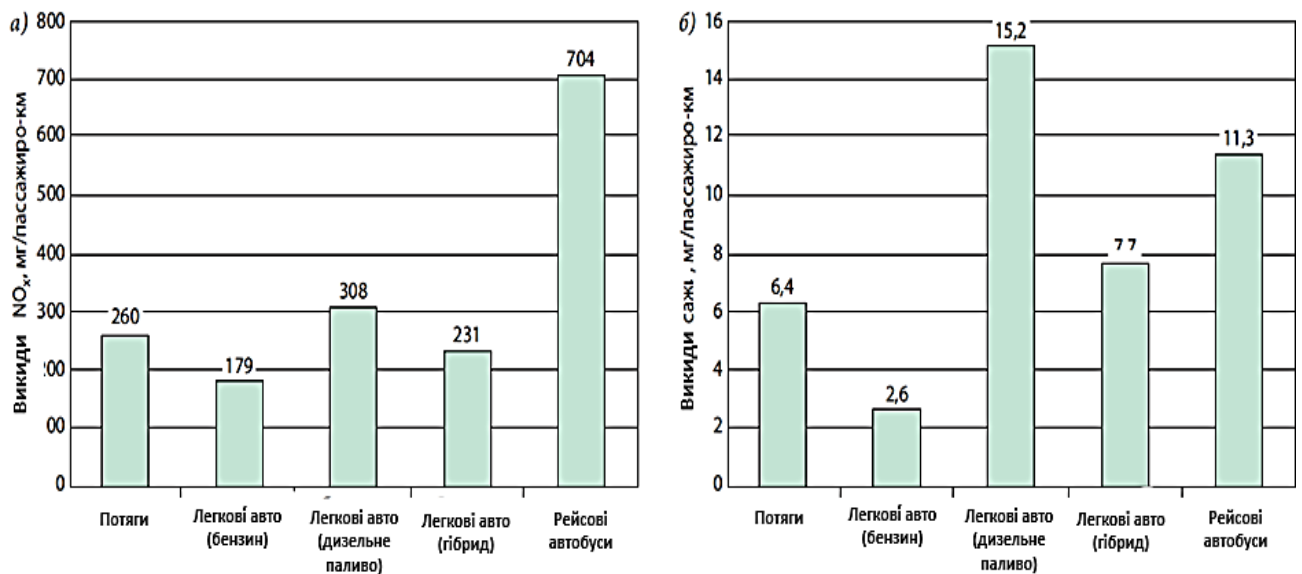


Рисунок 1.2 – Викиди оксидів азоту (а) та сажі (б) від пасажирського транспорту приміського сполучення в Німеччині

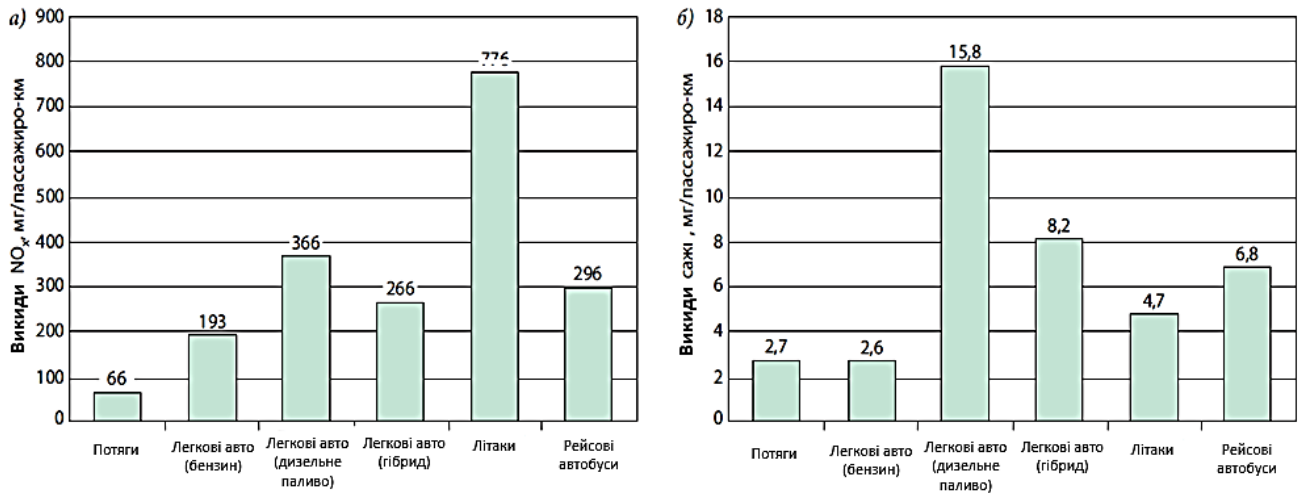


Рисунок 1.3 – Викиди оксидів азоту (а) та сажі (б) від пасажирського транспорту далекого сполучення в Німеччині

Ситуацію зі шкідливими викидами при тепловозній тязі характеризують дані, наведені на рис. 1.4.

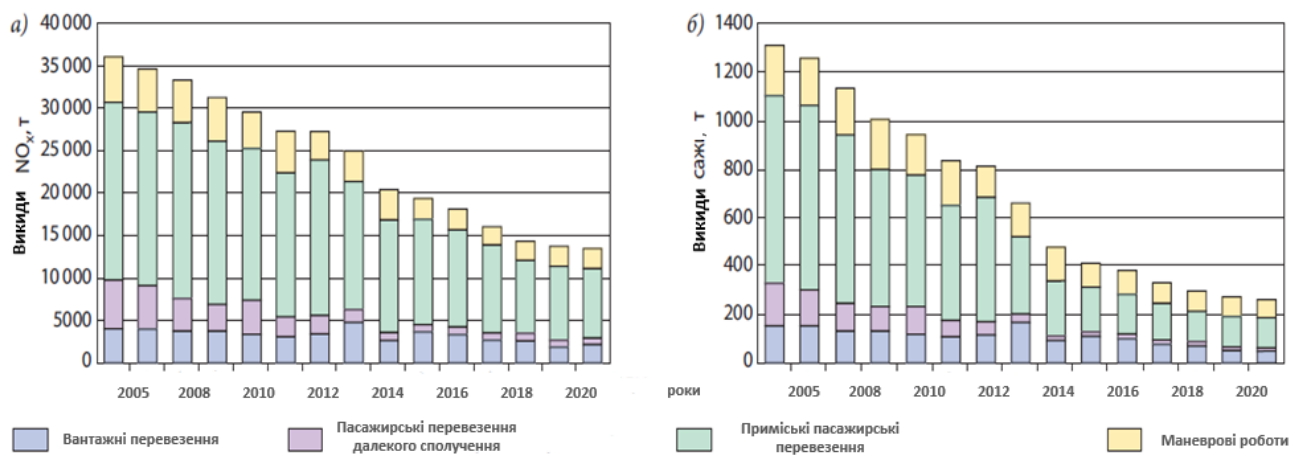


Рисунок 1.4 – Динаміка шкідливих викидів від дизельної тяги на DB (Німеччина) за 15 років.

а - оксиди азоту; б – сажа.

Загалом тепловозна тяга лише обмежено конкурентоспроможна по відношенню до інших видів транспорту, та її економічні переваги в порівнянні, наприклад, з автомобільним транспортом полягають тільки в меншій витраті енергії та знижених викидах CO<sub>2</sub>. За питомими показниками на 1 км пробігу дизельна тяга програє електричній. У той же час окремі дизель-поїзди з сучасними дизелями в регіональних перевезеннях показують цілком прийнятні результати порівняно з видами транспорту, що конкурують.

Наприклад, розрахунки викидів маси забруднюючих речовин виконані для кожного типу тепловозів (ЧМЕЗ та 2ТЕП6) та наведено до однієї години експлуатації тепловоза з урахуванням частки відносного часу його роботи на кожній з позицій контролера є досить різними.

Аналіз результатів розрахунків показує, що для тепловоза ЧМЕЗ найбільші викиди спостерігаються на третій позиції контролера ( $\text{NO}_x$  – 3,25 кг/год,  $\text{CO}$  – 3,23 кг/год,  $\text{C}$  – 0,15 кг/год). Для тепловоза 2ТЕ10 найбільші викиди відповідають одинадцятій позиції контролера ( $\text{NO}_x$  – 4,1 кг/год,  $\text{CO}$  – 1,7 кг/год,  $\text{C}_n\text{H}_m$  – 0,5 кг/год,  $\text{C}$  – 0,15 кг/год). Для тепловоза ТЕП70 0087 найбільші викиди спостерігаються також на одинадцятій позиції контролера ( $\text{NO}_x$  – 2,2 кг/год,  $\text{CO}$  – 1,23 кг/год,  $\text{C}_n\text{H}_m$  – 0,36 кг/год та  $\text{C}$  – 0,11 кг/год) [8].

Данні результати становлять значний інтерес, оскільки дозволяють отримати дані щодо максимально можливих значень викидів забруднюючих речовин для всього тепловозного парку мережі залізниць України. За наявності фактичних даних про час роботи окремих тепловозів за звітний період можна розрахувати дійсні маси викидів забруднюючих речовин.

Поруч з цим, основним фактором, що визначає економічну ефективність будь-якого виду транспорту, є повнота використання його технічних можливостей, раціональне використання та економічне витрачання енергетичних ресурсів.

Результати досліджень деяких науковців дозволяють припустити, що визначальним фактором технічного стану елементів циліндропоршневої групи та турбокомпресора дизелів в експлуатації є не лише ступінь завантаження, а й тривалість роботи на режимах, несприятливих для дизеля за коефіцієнтом надлишку повітря, температури випускних газів, димності.

За опублікованими даними [1, 6-7] для магістральних тепловозів відносна тривалість перехідних процесів у дизелі становить від 5 до 15%, для маневрових – від 20% і більше. Такий розподіл часу роботи на режимах, що не встановилися, обумовлює суттєвий вплив перехідних процесів на експлуатаційну ефективність тепловоза в цілому.

Як шляхи підвищення ефективності роботи силових установок у невстановлених режимах розглядалися [1]:

– вдосконалення схем та систем повітропостачання (А.С. Епштейн, А.П. Кудряш, В.В. Зеленов, В.М. Соболев, Є.Г. Заславський, А.М. Скаженник, В.В. Погребняк та багато хто інші);

- вдосконалення систем управління дизель-генератором (А.І. Володін, А.В. Новіков, А.А. Кабанов, С.І. Сухопаров та ін);

– вибір експлуатаційних характеристик навантаження дизеля (А.І. Володін, А.Е. Сімсон, С.І. Сухопаров, М.М. Дружинін та інші. Найбільш значні роботи у цьому напрямку проведені у ХПТі та Харківському заводі транспортного машинобудування);

– вдосконалення пристроїв подачі палива та систем керування цими пристроями.

При цьому можливості використання накопичувачів енергії для поліпшення якості перебігу перехідних процесів у зазначених роботах не торкалися.

Сьогодні достатньо поширеним методом підвищення якості робочого процесу в дизелі в невстановлених режимах є пошук шляхів зниження енергоємності накопичувача енергії.

Відомі методи управління силовим устаткуванням яких на базі досліджень роботи дизель-генератора та тягової передачі з накопичувачем енергії в силовому ланцюзі сформульовані математичні моделі роботи електроприводу тепловоза.

Реалізація перехідного процесу дозволяє істотно поліпшити екологічну ефективність силової установки і виключити термічні перевантаження деталей циліндропоршневої групи на режимах роботи, що не встановилися. У разі використання накопичувача великої ємності (понад 3700 кДж) значно скорочується тривалість перехідного процесу і покращуються динамічні тягові якості тепловоза.

Розміщення накопичувача зазначеної вище ємності при проектуванні нового локомотива не становить суттєвих труднощів. У той же час використання такого накопичувача для підвищення ефективності роботи існуючого тягового рухомого складу є скрутним.

Для магістральних локомотивів, де час перехідного процесу може становити 40-60 секунд, ситуація може бути вирішена за допомогою коригування принципу управління локомотивом. Сутність цього процесу полягає в тому, що між послідовними перемиканнями позицій з 1-ї по 15-ю потрібно здійснювати затримку зміни, протягом якої відбуватиметься заряд накопичувача[9, 10].

Для оптимізації оцінки процесу, що відбуваються в електроприводі, можна розглядали в наступних припущеннях [1, 9]:

1. Перетворювач постійного струму ППР є безінерційним і дозволяє підтримувати вихідну напругу постійною при зміні напруги (заряду) накопичувача за допомогою системи автоматичного керування;

2. Напруга на виході тягового випрямляча ТБ також підтримується постійною за допомогою системи автоматичного керування збудженням генератора;

3. У ланцюзі перетворювача ТБ та ППР введені додаткові опори величиною 0,001 Ом;

4. Вплив вихрових струмів та нелінійності магнітного ланцюга на електричні параметри можна не враховувати.

Протягом усього перехідного процесу потужність тяги тепловоза задається системою управління наступною функціональною залежністю:

– при постійній кутовій швидкості колінчастого валу дизеля:

$$P_{\text{на тягу}} = f(P_e, \omega_d);$$

– на етапі збільшення кутової швидкості колінчастого валу дизеля:

$$P_{\text{на тягу}} = f\left(P_e, \omega_d, \frac{d\omega_d}{dt}\right)$$

Застосування спеціального способу керування силовою установкою дозволяє скоротити кількість необхідної енергії – з 2000–3000 кДж до 200–300 кДж. Деякі результати розрахунків наведено на рис.1.5 [1, 9].

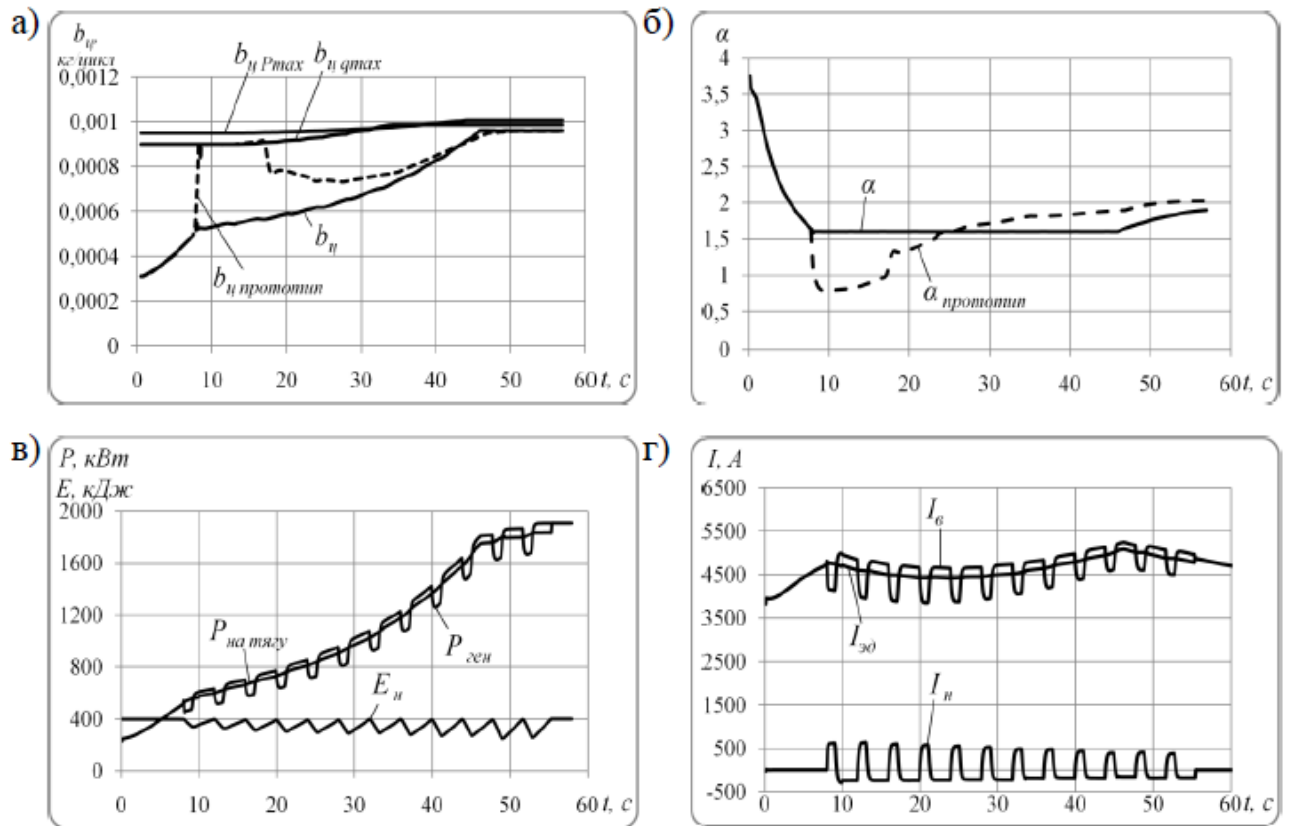


Рисунок – 1.5 - Зміна показників роботи силової установки тепловоза в перехідному процесі:

а) подачі палива; б) коефіцієнта надлишку повітря; в) потужності на тягу, потужності генератора та заряду накопичувача енергії; г) струму генератора, електродвигунів та накопичувача.

Розрахунок прискорення поїзда можна проводити за методикою, наведеною у «Правилах тягових розрахунків для поїзної роботи».

Отже, з метою оптимізації роботи двигуна сьогодні існують спеціальні додатки з елементами об'єктно-орієнтованого програмування, за допомогою яких можна проводити моделювання експлуатаційних режимів роботи тепловоза без попередньо закладеного алгоритму ведення поїзда шляхом

безпосередньої зміни керуючих сигналів у процесі руху, орієнтуючись за показаннями віртуальних приладів та віртуального профілю.

## 2. ПРОЦЕСИ СПАЛЮВАННІ ПАЛИВА ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ У АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ

### 2.1. Специфіка процесів у паливній апаратурі дизеля.

До складу ідеального термодинамічного циклу Дизеля входять чотири термодинамічні процеси [11]:

- ізобарний - протікає при постійному тиску;
- два адіабатних - протікають без теплообміну з навколишнім середовищем;
- ізохорний - протікає при постійному об'ємі.

Цей цикл є прямим газовим ізобарним циклом неповного розширення і зображується на діаграмі циклу Дизеля в координатах  $p$ - $V$  і  $T$ - $s$

Робота дизельного двигуна складається з чотирьох тактів:

- всмоктуючого,
- стиснення,
- робітника,
- випускного.

Детальний опис тактів дизельного двигуна наступний.

Процес 0-1 повітря всмоктується в циліндр двигуна внутрішнього згоряння;

У процесі 1-2 відбувається стиск повітря усередині циліндра. Процес протікає з високою швидкістю та мінімальними втратами тепла;

Процес 2-3 - через форсунку подається паливо у розпорошеному вигляді. Через високу температуру повітря відбувається детонація та займання палива з наступним згорянням. Внаслідок цього процесу виділяється теплота  $Q_1$ ;

Процес 3-4 - продукт згоряння розширюється. Гази, що утворилися в результаті згоряння палива, розширюються і діють на поршень. Здійснюється корисна робота.

У точці 4 відбувається відкриття випускного клапана. Вихлопні гази відводяться у довкілля.

Процес 4-1 - продукти згоряння ізохорно охолоджуються у навколишньому середовищі та виділяють теплоту  $Q_2$ . Після чого продукти згоряння виходять в атмосферу 1-0 і запускається новий цикл.

Коефіцієнт корисної дії двигуна є одним із найважливіших показників його роботи. Він визначається як ставлення корисної роботи, яку здійснює двигун, до енергії, що витрачається на його роботу. ККД вимірюється у відсотках і є показником того, наскільки ефективно двигун використовує вхідну енергію.

Коефіцієнт корисної дії двигуна, що працює за циклом Дизеля, залежить від ступеня стиснення, властивості палива, швидкості роботи, максимальної та мінімальної температури циклу.

Показники пуску дизеля істотно залежать від якості процесів подачі, розпилювання та розподілу палива в камері згоряння при реалізації цього режиму. Відомо, що навіть при позитивній температурі двигуна та навколишнього середовища погіршене диспергування палива у факелі при низькій пусковій частоті обертання призводить до того, що лише частина поданого в циліндр палива встигає випаруватися і взяти участь у згорянні, а отже у створенні позитивного моменту. Для підвищення частки палива, розпорошеного до ступеня, що забезпечує його випаровування, сумішоутворення, згоряння застосовують пускові збагачувачі, завдяки яким геометрична продуктивність насоса зростає в 1,8 - 2,2 рази порівняно з номінальною. Однак у цьому випадку ускладнюється конструкція паливного насоса, а через ступінчасту форму плунжера зростає обсяг лінії високого тиску (ЛВТ), що знижує якість процесу палива-подачі. Паливо, що не випарувалося, не тільки не бере участі в процесі створення позитивної роботи, але і знижує економічність операцій пуску - розгону, призводить до розрідження мастила та ін. Однією з причин погіршення якості процесу подачі палива в режимах

пуску - розгону є перехідний процес лінії високого тиску (ЛВТ) паливної системи.

Одним з параметрів, що впливають на показники процесу подачі палива, є початковий тиск палива в ЛВТ паливної системи перед черговим циклом впорскування. Для двигунів розмірностей автотракторного призначення доцільно прагнути підвищення, оскільки це забезпечує за інших рівних умов зменшення негативного впливу стисливості палива в ЛВТ, підвищення швидкості поширення звуку, а кінцевому підсумку - підвищення інтенсивності впорскування палива. Залишковий тиск у ЛВТ паливної системи після чергового циклу паливоподачі для зазначених двигунів доцільно мати зниженим, що досягається зазвичай підвищеним обсягом розвантажувального пояса нагнітального клапана. В результаті підвищеного розвантаження ЛВТ відбувається скорочення періоду подачі палива в циліндр зі знижується тиском, зменшується підтікання палива з форсунки в кінці впорскування, тобто більш інтенсивною стає відсікання подачі, що позитивно позначається в цілому на процесі подачі палива і робочому процесі в циліндрі двигуна.

Шкідливі викиди та природні речовини в атмосфері піддаються складним процесам перетворення, взаємодії, вимивання тощо. Ці процеси різні для завислих частинок і газоподібних домішок. Час знаходження зважених частин в атмосфері залежить від їх фізико-хімічних властивостей, метеорологічних параметрів та деяких інших факторів, насамперед від висоти викиду частинок в атмосферу та їх розмірів.

Основними шляхами виведення аерозолів з атмосфери (самоочищення) є осадження частинок під впливом сил тяжіння, осадження їх на рослини та водойми, а також вимивання дощем.

Частинки діаметром від 4 до 10 мкм піднімаються з димом на висоту понад 1 км та можуть переміщатися потоком повітря на сотні кілометрів. Частинки від 1 до 4 мкм дуже повільно осідають, досягаючи земної поверхні протягом року.

Частки менше 1 мкм поширюються подібно до молекул газу.

Питання про термін існування та перетворення газоподібних забруднень атмосфери вивчено ще недостатньо. Наприклад, діоксид сірки зберігається, за даними різних дослідників, від кількох годин за кілька днів.

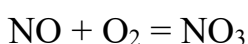
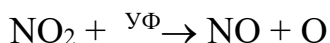
Діоксид сірки в атмосфері поступово окислюється до триоксиду сірки, який взаємодіючи з вологою повітря утворює сірчану кислоту. На швидкість процесу окиснення впливає сонячне світло і дрібні частки пилу, що каталітично прискорюють процес окиснення. На процес окиснення впливає також вологість повітря. Зі збільшенням вологості процес окиснення сірчистого ангідриду прискорюється.

Встановлено, що в атмосфері відбувається реакція фотодисоціації діоксиду азоту  $\text{NO}_2$  на  $\text{NO}$  і  $\text{O}$ , при цьому поглинається випромінювання ультрафіолетової області сонячного спектру, що відіграє важливу роль в атмосферних фотохімічних процесах. Енергія, необхідна для розриву зв'язку між азотом та киснем, становить близько 300 кДж/моль.

Наслідком дисоціації  $\text{NO}$  є багато вторинних реакцій. Спільне окиснення вуглеводнів і оксидів азоту призводить до утворення сполук, які в результаті подальших реакцій утворюють так звані пероксиацилнітрати (ПАН), що володіють сильною токсичною дією. Речовини групи ПАН можна виявити у забрудненому міському повітрі під час токсичного туману (смогу).

Серед вторинних фотохімічних реакцій важливе значення має взаємодія молекулярного кисню та оксиду азоту  $\text{NO}$  з атомарним киснем, у результаті утворюються озон  $\text{O}_3$  та діоксид азоту.

Фотохімічні реакції з діоксидом азоту протікають у таких напрямках:



В результаті перерахованих реакцій відбувається поступове доокислення монооксиду  $\text{NO}$  до діоксиду  $\text{NO}_2$ , у міру видалення димового факела від димової труби. На виході з димової труби 85-90% всіх оксидів азоту

представляє NO. Підсумкове перетворення NO в NO<sub>2</sub> призводить до посилення негативного впливу продуктів згоряння на природу та живі організми, оскільки останній більш токсичний.

Встановлено, що основною причиною фотохімічних перетворень у приземному шарі атмосфери міст є високий рівень забруднення повітря органічними речовинами (переважно нафтового походження) та оксидами азоту.

Сумарна концентрація окислювачів, які називаються ще оксидантами, що утворюються в атмосферному повітрі в результаті фотохімічних перетворень, у ряді випадків може бути використана як гігієнічний показник інтенсивності перебігу цих реакцій. Концентрації оксидантів схильні до великих коливань, але спостерігається певна закономірність.

При високих концентраціях NO та NO<sub>2</sub> вони частково окислюються під впливом сонячної радіації до вищого оксиду азоту N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, який взаємодіючи з вологою повітря утворює азотну кислоту.

З'єднання ванадію, аерозолі бенз(а)пірена, поширюючись на атмосфері разом із пилом, дощем чи снігом, осідають на ґрунт та водойми.

Майже всі речовини, що викидаються, не є сторонніми для навколишньої природи та беруть участь у кругообігу речовин між атмосферою, літосферою та гідросферою. Так, в атмосфері Землі міститься близько 2000 млрд. т вуглецю у вигляді вуглекислого газу CO<sub>2</sub>. При цьому близько 100 млрд. т/рік перебуває у стані безперервного кругообігу між атмосферою, сушею та морем. Таким чином, загальні виділення CO<sub>2</sub> в результаті людської діяльності, що становлять нині приблизно 15 млрд. т на рік, не призведуть до значних змін, оскільки невелике збільшення CO<sub>2</sub> у повітрі компенсує здатність рослин та водоростей поглинати вуглекислий газ. Однак подальше збільшення викидів CO<sub>2</sub> може вплинути на клімат планети завдяки так званому парниковому ефекту. Парниковий ефект для Землі – це підвищення середньої температури планети завдяки тому, що вуглекислий газ

пропускає теплове випромінювання Сонця і водночас є теплозахисним екраном зворотного потоку тепла [3].

Наявність оксидів сірки та азоту в повітрі на віддалі від джерел викиду в сотні разів менше допустимих концентрацій. Пояснюється це тим, що час перебування у атмосфері більшості забруднюючих компонентів вбирається у кількох діб.

Найбільше значення для тваринного світу має кисень повітря. У процесі дихання тварин та горіння палива зменшується його концентрація в атмосфері, яка відновлюється рослинним світом суші та океану.

Відчутних змін концентрації кисню у атмосфері немає. Однак це зовсім не означає, що проблема у глобальному масштабі вичерпана, оскільки одночасно з антропогенним використанням кисню у світі відбуваються й інші процеси, що негативно впливають на відтворення кисню.

Азотовмісні сполуки, що входять до складу рідких та твердих палив, є джерелом утворення паливних оксидів азоту. Зважаючи на те, що енергія дисоціації зв'язків N-N в 2-4 рази перевищує енергію дисоціації зв'язків C-N і N-H, азотовмісні сполуки, що входять до складу палива, легше перетворюються на NO, ніж молекулярний азот повітря. Перетворення азоту палива на оксиди азоту відбувається за наявності в зоні реакції достатньої кількості кисню вже при температурах 250-300°C [6].

Особливістю утворення паливних NOx є наявність «конкуруючих» реакцій: проміжні радикали (аміни NH<sub>i</sub> і ціаніди CN<sub>i</sub>), що утворюються при виході летких, при надлишку окислювачів (O, OH) переходять в NO, а при недоліку, тобто. у середовищі, збагаченому паливом, утворюють міцну молекулу N<sub>2</sub>.

При горінні твердих і рідких палив азоту органічні нітросполуки, присутні в паливі, ймовірно, зазнають деяке термічне розкладання, перш ніж потрапити в зону горіння. Тому попередниками утворення NO повинні бути азотовмісні сполуки з малою молекулярною масою, наприклад, NH<sub>3</sub>, HCN, CN. Ось чому у разі спалювання твердих та рідких палив у потоці повітря

утворення паливних оксидів азоту протікає досить швидко - в основному на стадії вигорання летких, яка завершується на початковій ділянці факела.

Коефіцієнт перетворення (або ступінь конверсії) азотовмісних компонентів палива на оксиди азоту змінюється в залежності від вмісту зв'язаного азоту палива NP. При дуже низькому змісті NP має місце майже повна конверсія NO.

Експериментальні дослідження виявили, що утворення діоксиду азоту відбувається у двох зонах: передполум'яної та післяполум'яної. У першій зоні NO<sub>2</sub>, що утворився, повністю розкладається. У той же час швидке перемішування гарячих і холодних областей у турбулентному полум'ї може призвести до швидкого заморожування NO<sub>2</sub>, що є причиною появи великих концентрацій діоксиду азоту в холодних зонах потоку.

Емісія NO<sub>2</sub> в післяполум'яній зоні відбувається у верхній частині топки і в горизонтальному газоході (при T 900-1000 K) і за певних умов також може досягати помітної величини [6].

Геміоксид азоту N<sub>2</sub>O, що утворюється при спалюванні палив, є, мабуть, короткочасною проміжною речовиною. Геміоксид азоту N<sub>2</sub>O практично відсутній у продуктах згоряння.

## 2.2 Методи визначення валових викидів при спалюванні палива

Методи розрахунків валових викидів використовуються як база для моделювання параметрів експлуатаційного процесу та напрямків екологізації роботи двигунів. До основних завдань екологізації - зниження токсичності та димності дизелів входять розробки засобів та методів регулювання, діагностування та випробувань паливних насосів високого тиску та двигунів внутрішнього згоряння в умовах експлуатації, що відповідає пріоритетному напрямку «Екологічно чиста енергетика та енергозберігаючі технології».

Широке використання режимів малих навантажень, самостійного і примусового холостого ходу є причиною підвищеного викиду в атмосферу

продуктів неповного згоряння. Робота дизеля в режимах холостого ходу характеризується збільшенням викидів оксиду вуглецю та вуглеводнів та зменшенням викидів оксидів азоту. Значне збільшення названих токсичних компонентів спостерігається під час роботи дизеля з навантаженнями, близькими до повним. У дослідженнях щодо впливу режимів роботи на склад відпрацьованих газів дизелів отримано різні результати [8]. У роботі [6] зазначається, що у дизелях з турбонаддувом вміст оксиду вуглецю та сажі у відпрацьованих газах у перехідному режимі у 8...10 разів вище, а вміст оксидів азоту на 25...30% нижче порівняно з роботою на встановлених режимах. Для вихрекамерних дизелів без наддуву вміст продуктів неповного згоряння в перехідних режимах відрізняється від тих, що встановилися значно менше, хоча різниця досягає 40 ... 60%.

Загальна маса шкідливих речовин, що виділяються під час спалювання палива транспортом, залежить від режиму роботи двигуна автомобіля або тепловоза протягом рейсу. Розглядаючи роботу автомобіля або тепловоза, можна виділити три характерні режими роботи двигуна [1, 10]:

*холостий хід:*

а) для автомобіля та тепловоза – при завантаженні, очікуванні та на спуску;

б) для дизель-тролейвозу та тягового агрегату – те саме, а також під час руху під контактною мережею;

*повне використання потужності двигуна:*

а) для автомобіля та тепловоза – при русі на підйом та при русі навантаженого поїзда горизонтальними ділянками траси;

б) для дизель-тролейвозу та тягового агрегату – при русі навантаженого поїзда по горизонтальних ділянках у вибої та на відвалі;

*часткове (приблизно 50-відсоткове) використання потужності двигуна:*

- при русі всіх видів локомотивів горизонтальними ділянками траси в порожньому стані і при розвантаженні [10].

Маса річного викиду шкідливих речовин від спалювання палива у двигунах автомобілів або тепловозів розраховується за формулою 1, в т/рік:

$$m_{ar} = \sum_{i=1}^n m_{ati} \quad (1)$$

де  $n$  - загальна кількість домішок, що викидаються в атмосферу;  $i$  - види домішок, що викидаються джерелом ( $i = 1 \dots n$ );  $m_{ati}$  - маса  $i$ -ї шкідливої речовини, що виділяється при роботі автомобіля (тепловозу), т/рік.

$$m_{ati} = m_{ik} \cdot n_{год} \cdot N_{ар} \cdot k_t \cdot k_l \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

де  $m_{ik}$  - маса  $i$ -го шкідливої речовини, що виділяється двигуном при роботі на різних режимах, кг/добу;  $k$  - режим роботи двигуна;  $n_{год}$  - число днів роботи машини на рік;  $N_{ар}$  - кількість працюючих автосамоскидів (локомотивоскладів);  $k_t$  - коефіцієнт впливу кліматичних умов роботи: для автомобілів, згідно [6] приймається рівним 1; для тепловозів, згідно [1] приймається рівним 0,8 на північ від  $60^\circ$  північної широти, для інших районів - рівним 1;  $k_l$  - коефіцієнт, що залежить від віку та технічного стану парку; для тепловозів та автосамоскидів з терміном експлуатації менше 2 років приймається рівним 1, при терміні експлуатації більше 2 років - 1,2 [1].

Маса  $i$ -го шкідливої речовини розраховується за формулою 3, в кг/добу:

$$m_{ik} = \sum_{k=1}^j q_{ik} \cdot t_k \quad (3)$$

де  $q_{ik}$  - питомий викид  $i$ -го шкідливої речовини при роботі двигуна на  $k$ -му режимі для двигунів тепловозів та тягових агрегатів та для дизельних двигунів;  $t_k$  - час роботи двигуна на  $k$ -му режимі на добу, год., визначається виходячи з часу роботи двигуна в даному режимі протягом рейсу та сумарного часу роботи машини на добу.

Максимальний з разових викидів і-го шкідливої речовини з відпрацьованими газами автомобілів тепловозів розраховується за формулою 4, в г/с:

$$m_{\text{атр}} = m_{\text{ік}} \cdot N_{\text{ар}} / 24 \cdot 3,6 \quad (4)$$

Результати дослідження щодо зниження вмісту у відпрацьованих газах (ВГ) оксидів азоту за рахунок застосування рециркуляції газів та зменшення кута випередження упорскування палива (КВУП). При роботі дизеля з рециркуляцією газів заряд у циліндрі двигуна ( $G_F$ ) складається зі свіжого атмосферного повітря ( $G_s$ ), залишкових ( $G_y$ ) та рециркульованих газів РВГ ( $G_{rg}$ ):

$$G_F = G_s + G_y + G_{rg} \quad (3)$$

При рециркуляції вміст кисню в циліндрах двигуна значно знижується, що відбивається як свіжого заряду і враховується коефіцієнтом якості заряду при рециркуляції:

### 2.3. Принципи удосконалення методики визначення кількості шкідливих викидів транспортними ДВЗ у навколишнє середовище

Відомо, що серед всіх споживачів палива саме ДВЗ тепловозного парку локомотивного господарства, в першу чергу, в силу специфіки своєї роботи, є головними джерелами шкідливих викидів в навколишнє середовище на залізничному транспорті. На їх частку припадає 30% викидів  $CO$ , 42% викидів  $NO_x$ , близько 16% викидів  $SO_x$  і 21% частинок сажі (в перерахунку на  $C$ ). Таким чином, основна кількість викидів шкідливих речовин припадає на оксиди азоту[8].

Отже, проблеми негативного впливу техніки на навколишнє середовище, не дивлячись на постійні намагання конструкторів, технологів та спеціалістів з експлуатації тягового рухомого складу (ТРС), нажаль, не зменшуються. Поки що невідомо, в яку сторону зміняться на практиці сумарні

абсолютні величини «екологічних відрахувань» відповідних підприємств локомотивного господарства залізниць України, чи промислових підприємств залізничного транспорту (ППЗТ), що експлуатають тепловози різного роду роботи. Мова буде йти виключно про об'єктивність кількісної оцінки, без можливих пропозицій активного впливу на технічний стан силових установок тепловозів[8, 12-14].

Приклад демонстраційного розрахунково-експериментального визначення сумарної маси шкідливого викиду за добу (в даному випадку – вуглецю) приведено в таблиці 1.

Вихідні дані стосовно потужності ЛЕУ (кВт) і часу роботи (год.) за позиціями КМ на протязі доби (теж за конкретними позиціями) наведені з літературних джерел [8]. В таблиці 2.1, наприклад, ці дані відносяться до тепловоза серії 2ТЭ10В магістрального роду транспортної роботи.

Слід зазначити, що інтервал «доба» може бути замінено любым контрольованим інтервалом («поїздка», «місяць»).

Таблиця 2.1 - Приклад розрахунку сумарної маси викидів вуглецю дизелем 10Д100 за контрольований бюджет робочого часу (24 год.) [8].

ПКМ	Потужність ЛЕУ, кВт	Час роботи дизеля, год.	Питома кількість (інтенсивність викидів), кг/(кВт·год)	Маса викидів (С), кг
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
0 (х.х.)	24	11,96	110	31,6
1	147	0	60	0,0
2	268	0,46	35	4,3
3	430	0,69	34,5	10,2
4	577	0,81	30,2	14,1
5	750	0,58	30	13,1
6	900	0,81	29	21,1
7	1040	0,69	28	20,1
8	1217	1,04	28	35,4
9	1386	1,15	28	44,6
10	1544	1,73	28	74,8
11	1706	1,27	28	60,7
12	1830	0,62	29	32,9
13	1934	0,46	30	26,7
14	2074	0,35	31	22,5
15	2200	0,41	32	28,9
<b>Всього за час роботи:</b>				<b>441</b>

Наведені дані (табл.2.1) демонструють, що добовий викид тільки вуглецю (сажі) з вихлопними газами дизеля 10Д100 (силової установки секції магістрального тепловоза 2ТЭ10В), згідно з наявними вихідними даними і результатами аналітичних розрахунків, складе 441 кг. Усереднено інтенсивність викиду вуглецю з вихлопними газами зазначеного тепловозного дизеля складе 18,4 кг/год [8].

Отже, екологічний податок сплачується платниками податку під час придбання палива, а податковими агентами, які реалізують паливо, цей податок утримується і сплачується до бюджету.

Разом з цим виникає низка питань щодо об'єктивності методологічного забезпечення на якому базується монетизація реальних збитків довкіллю. Також, слід зазначити, що платники податку у разі використання ними палива не складають звітів з цього податку [8, 12-14].

Таким чином, авторами статті [8] пропонується удосконалити методику кількісної експлуатаційної оцінки тепловозних «джерел» шкідливих викидів не залежно від роду виконуваної ними транспортної роботи шляхом реалізації можливості встановлення контрольно-діагностичних паливо-екологічних комплексів (КДПЕК), поставлених в свій час в локомотивні депо.

### 3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИКИДІВ ВІД ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ ТА ДОВКІЛЛЯ

Найбільші забруднення атмосферного повітря надходять від установок, що працюють на вуглеводневому паливі (бензин, гас, дизельне паливо, природний газ та ін.). Кількість забруднень визначається складом, обсягом палива, що спалюється, і організацією процесу згоряння. Основними речовинами, що потрапляють в атмосферу при згорянні ископного палива, є  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , тверді частинки та парникові гази, такі як  $\text{CO}_2$ . Інші речовини, наприклад важкі метали, фтористий водень, галоїдні сполуки, незгорілі вуглеводні, неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС) і діоксини викидаються в атмосферу в невеликих кількостях, але можуть становити значний вплив на навколишнє середовище через свою токсичність або стійкість. Викиди летючої золи можуть також включати частинки з аеродинамічним діаметром менше 10 мкм, звані  $\text{PM}_{10}$ .

Незважаючи на успіхи, досягнуті в галузі скорочення антропогенних викидів основних забруднювачів повітря за останні десятиліття, погана якість повітря, як і раніше, залишається однією з важливих проблем охорони здоров'я (ЕАОС, 2010) [15]. Особливо це стосується переносимих повітрям ВЧ, тропосферного (приземного) озону ( $\text{O}_3$ ) і діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ).

Ще у 2012 році Міжнародне агентство з дослідження раку (МАДР) Всесвітньої організації охорони здоров'я дійшло висновку про те, що викиди з дизельних двигунів є канцерогенними для людини з урахуванням переконливих доказів того, що їх вплив підвищує ризик захворювання на рак легенів. У зв'язку з цим МАДР скоригувала висновки, зроблені ним у 1988 році, коли воно класифікувало викиди дизельних двигунів як потенційно канцерогенні для людини. Висновки, зроблені на основі попередньої оцінки, проведеної в 1989 році, про те, що викиди з бензинових двигунів є потенційно канцерогенними для людини, змін не зазнали [15].

Доречно зазначити, що рішення МАДР було однотайним і ґрунтувалося на "неспростовних" наукових доказах. МАДР звернулося до людей усього

світу з наполегливим закликком максимально обмежити своє перебування у місцях, де вони можуть зазнавати впливу дизельних викидів. Щодня велике число людей піддається впливу викидів з дизельних двигунів через їх професійну діяльність, і вдихання навколишнього повітря. Люди піддаються впливу викидів не тільки двигунів автотранспортних засобів, але й з інших дизельних двигунів, включаючи двигуни, що експлуатуються на інших видах транспорту (наприклад, у дизельних складах та судах), а також у стаціонарних джерелах енергії (наприклад, електрогенераторах та генераторах рухів, що використовуються в енергетиці).

Разом з тим зростаюча стурбованість у зв'язку з канцерогенним впливом викидів з дизельних двигунів заснована на висновках, зроблених в ході епідеміологічних досліджень, які були підтверджені опублікованими результатами аналізу професійного впливу таких викидів на шахтарів, що працюють під землею, проведеного Національним інститутом раку та Національним інститутом з охорони праці та промислової гігієни США. Цей аналіз свідчить про підвищення ризику смерті внаслідок захворювання на рак легенів [15].

### 3.1. Основні забруднювачі атмосферного повітря при спалюванні рідкого палива

Контроль концентрацій газо- та пароподібних домішок атмосферного повітря здійснюється за допомогою газоаналізаторів, що дозволяють здійснювати миттєвий та безперервний контроль вмісту в ньому шкідливих домішок.

Основні забруднювачі, концентрації яких вимірюються на стаціонарних постах спостереження: оксид азоту (NO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), оксид вуглецю (CO), зважені частки (пил), а також аміак (NH<sub>3</sub>), озон (O<sub>3</sub>).

Оксид азоту (NO) - це безбарвний газ без запаху, що має високу реакційну здатність, який сам по собі нешкідливий для людини, 3-го класу

небезпеки. Однак варто сонцю прогріти повітря, як у результаті фотохімічного окислення оксид азоту перетворюється на набагато небезпечніший діоксид азоту ( $\text{NO}_2$ ).

Діоксид азоту ( $\text{NO}_2$ ) - рудо-бурий газ, який утворює «лисий хвіст», речовина 2-го класу небезпеки. Основними антропогенними джерелами є процеси високотемпературного згоряння різних видів палива (природного газу, вугілля, бензину, мазуту) на теплових електростанціях, промислових установках та автомобільних двигунах.

Діоксид азоту та оксид азоту відіграють важливу роль у фотохімічних процесах, що відбуваються у тропосфері під впливом сонячної радіації, часто є причиною утворення фотохімічного смогу, високих концентрацій приземного озону та формальдегіду, а також кислотних дощів.

Вплив оксидів азоту на людину призводить до порушень функцій легень та бронхів, до зростання сприйнятливості до інфекцій дихальних шляхів, нападу астми. Впливу оксидів азоту більшою мірою схильні діти і дорослі, які страждають на серцево-судинні захворювання.

Діоксид сірки, сірчистий ангідрид ( $\text{SO}_2$ ) - безбарвний газ з характерним різким запахом (запах сірника, що спалахує), 3-го класу небезпеки. Міститься у викидах підприємств чорної та кольорової металургії, виробництва кераміки, капролактаму, лінолеуму, руберойду, толю, пергаміну, пінопласту, мінераловолокнистих плит; у викидах харчової, текстильної та паперової промисловості, а також підприємств теплоенергетики-теплових електростанцій (ТЕЦ, ДРЕС, котельні) та ін [15].

Дія діоксиду сірки в концентраціях вище гранично допустимих може призводити до суттєвого збільшення різних хвороб дихальних шляхів, впливати на слизові оболонки, викликати запалення носоглотки, бронхіти, кашель, хрипоту та біль у горлі. Особливо висока чутливість до діоксиду сірки спостерігається у людей із хронічними порушеннями органів дихання, з астмою.

Високі концентрації діоксиду сірки спричиняють серйозне пошкодження рослинності. Гостро пошкодження, викликане діоксидом сірки, відбивається у появі білястих плям на широколистих рослинах (особливо шпинату, салату, бавовни та люцерни), а також голок сосни. Вплив SO<sub>2</sub> на ґрунт знижує її родючість, т.к. у своїй відбувається закислення. У присутності діоксиду сірки прискорюється корозія металів повітря.

Оксид вуглецю (CO) – безбарвний газ, що не має запаху, відомий також під назвою «чадний газ», 4-го класу небезпеки.

Оксид вуглецю утворюється в результаті неповного згоряння викопного палива (вугілля, газу, нафти) в умовах нестачі кисню та за низької температури.

65% всіх викидів оксиду вуглецю посідає транспорт, 21% - на дрібних споживачів і побутової сектор, а 14% - на промисловість. Екстремальні концентрації часто спостерігаються в районах підвищеного антропогенного навантаження на навколишнє середовище: у години пік на транспорті або при інверсіях (тобто в умовах слабкого повітряного обміну), що сприяють виникненню смогу.

При вдиханні чадний газ утворює міцні комплексні сполуки з гемоглобіном крові людини і тим самим блокує надходження кисню до крові. Це викликає головний біль, нудоту, а при вищій концентрації - смерть.

Озон (O<sub>3</sub>) – це газ, який є як у верхніх шарах атмосфери, і лише на рівні Землі, 1-го класу небезпеки.

Залежно від розташування в атмосфері озон може бути "хорошим" або "поганим" для довкілля та здоров'я людини. Стратосферний озон захищає життя на Землі від шкідливого ультрафіолетового випромінювання Сонця.

Приземний (тропосферний) озон утворюється під час хімічної реакції під впливом сонячного випромінювання. Освіта його високих концентрацій найімовірніше в теплу пору року. Вдихання озону може спричинити кашель, задишку, подразнення дихальних шляхів. Діти та люди похилого віку

особливо чутливі до озону, він також небезпечний для тих, у кого є захворювання легень.

Зважені частинки (пил) - поширений забруднювач атмосферного повітря, що включає суміш твердих і рідких частинок, що знаходяться у зваженому стані. Зважені частинки включають дрібнодисперсні частинки PM10 і PM2,5 [15].

Дрібні частинки PM10 і PM2.5 - тверді мікрочастинки розміром менше 10 мкм - PM10 і менше 2,5 мкм - це PM2.5, що знаходяться в повітрі у зваженому стані, які утворюються в результаті спалювання різних видів палива (вугілля, нафта, газ).

У великому місті в повітрі завжди є частки PM2.5 і в будь-якому випадку людина вдихає їх. Якщо з кожним днем у людину потрапляє більше шкідливих частинок, ніж встигає вийти, тоді вони накопичуватимуться в організмі. Основна небезпека PM2.5 полягає не в різких стрибках концентрації, а в хронічному впливі цих частинок на організм. Симптоми отруєння PM2.5 будуть проявлятися непомітно. На день середньостатистичний міський житель вдихає 200 мільярдів частинок PM2.5. Половина з них відкладається у легенях. Одна така доза обійдеться без серйозних наслідків. Але з часом відкладення PM2.5 в організмі перевалять за критичний рівень, що призведе до зростання захворюваності на респіраторні та серцево-судинні хвороби, наприклад, погіршення стану при астмі, захворювання дихальних шляхів, збільшення смертності від серцево-судинних, респіраторних та онкологічних захворювань.

### 3.2. Методи нормування та оцінка впливу викидів

Гранично допустимі концентрації (ГДК) домішок. Основною фізичною характеристикою домішок атмосфери є концентрація – маса (мг) речовини в одиниці об'єму (м<sup>3</sup>) повітря за нормальних умов. Концентрації домішок визначає фізичне, хімічне та ін. види впливу на людину та навколишнє

середовище та служить основним параметром при нормуванні вмісту домішок в атмосфері.

ГДК - це максимальна концентрація домішок в атмосфері, віднесена до певного часу опосередкування, яка при періодичному впливі або протягом всього життя людини не надає ні на нього, ні на навколишнє середовище в цілому шкідливої дії (включаючи окремі наслідки).

Якщо речовина надає на навколишню природу шкідливу дію в менших концентраціях, ніж організм людини, то за нормування виходять із порога впливу цієї речовини на навколишню природу.

Максимальна разова ГДК<sub>мах</sub> - основна характеристика небезпеки шкідливих речовин. Вона встановлюється для попередження рефлекторних реакцій у людини (відчуття запаху, світлової чутливості, зміна біоелектричної активності головного мозку та ін) при короткочасному впливі атмосферних домішок. Середньодобове ГДК<sub>сд</sub> встановлено для попередження загальнотоксичного, канцерогенного, мутагенного та інших впливів речовин на організм людини.

У випробуваннях транспортних засобів, заснованих на реальних вимірюваннях, все частіше використовується індекс токсичності  $M_i$ . Це частка  $j$ -ї токсичної сполуки та викидів  $CO_2$ , помножити на константу  $k$  ( $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x = 10^3$ ,  $PM = 10^5$ ), як представлено у формулі (1). Порівняльні аналізи викидів забруднюючих речовин для різних груп транспортних засобів може бути важко реалізувати. Це є результатом характеру призначення об'єкта та умов експлуатації.

Особливо це стосується NRMM (недорожня мобільна техніка).

$$M_i = k \cdot (m_j / m_{CO_2}) \quad (1)$$

Основними продуктами згоряння в двигунах є  $CO_2$ , вода і тепло, що перетворюються на механічну роботу. Викиди  $CO_2$  безпосередньо пов'язані зі споживанням палива. Водночас він може бути мірилом правильності процесу

згоряння та якості роботи позамоторних систем очищення вихлопних газів. Токсичні сполуки, такі як CO, HC, NO<sub>x</sub> і PM, є продуктами неповного згоряння і горіння при високій температурі і тиску. Враховуючи ці факти, можна порівняти викиди CO<sub>2</sub> з іншими викидами токсичних речовин і на основі цього визначити показники токсичності *Mi*.

## 4. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПЕРСПЕКТИВ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

Як показує досвід, зниження шкідливих викидів від транспортних засобів має здійснюватися, перш за все, за рахунок покращення екологічних характеристик самого транспортного засобу за оптимальних режимів його руху та питомих витрат моторного палива. Це може бути досягнуто через поетапне оновлення експлуатованого парку шляхом заміни "старих" транспортних засобів, що виводяться з експлуатації, на сучасні та екологічно безпечні, шляхом модернізації експлуатованих транспортних засобів за рахунок оснащення їх пристроями очищення газів, що йдуть, або переведенням їх на "чистіше" паливо (наприклад, газове), вибором оптимальних режимів виконання поїзної роботи. Тому пошук шляхів зниження токсичності відпрацьованих газів тепловозів є важливим для залізничного транспорту. При цьому першочергову увагу слід звернути до заходів щодо зниження концентрації оксидів азоту.

Отже, заходи щодо зниження вмісту шкідливих викидів у вихлопних газах поділяють на ті, що відносяться до конструкції дизеля і таких, що не належать до неї [16-33].

### 4.1. Технічні підходи до вирішення екологічних проблем дизельних двигунів.

У коротко-, середньо- чи довгостроковій перспективі простежуються дві тенденції вдосконалення тягового рухомого складу, які у принципі різняться філософією двигуна. У довгостроковій перспективі надається перевага електричним двигунам, робота яких не супроводжується шкідливими викидами. Поруч із можливе застосування численних змішаних варіантів, наприклад гібридних систем.

Концепція, що реалізується в коротко- або середньостроковій перспективі, базується на використанні чи вдосконаленні двигунів

внутрішнього згоряння та застосуванні альтернативних видів палива – біологічного, природного газу, водню. Поступова заміна одного енергоносія іншим повинна проводитися з урахуванням переваг та недоліків альтернативного палива щодо економічних аспектів його отримання та застосування.

Зміни, які вносяться в конструкцію двигуна, безпосередньо впливають на процеси згоряння палива та утворення шкідливих речовин. Первинні шкідливі викиди двигуна можна знизити шляхом оптимізації способів спалювання, упорскування та звичайного наддуву. Можуть бути також реалізовані і нетрадиційні заходи, наприклад, упорскування суміші палива з водою (DWE), метод Міллера, а також використання в процесі наддуву вихлопних газів (турбонаддув, рис. 4.1). Тут вихлопні гази обертають турбіну, яка, у свою чергу, надає руху компресору, що подає в циліндри наддувне повітря. Всі ці заходи передбачають глибоке втручання у конструкцію двигуна і можуть бути виконані, як правило, лише в рамках модернізації дизелів або створення нового рухомого складу.

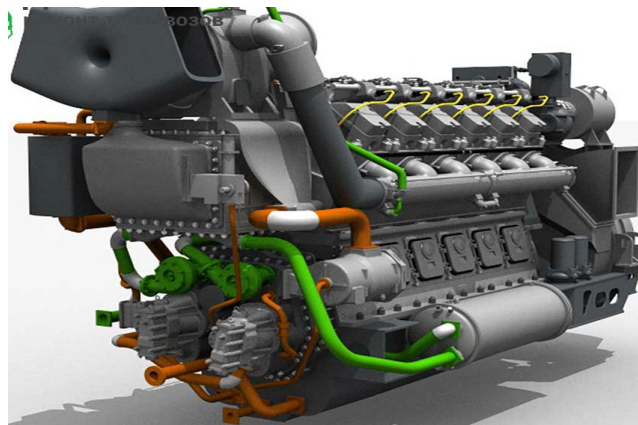


Рисунок 4.1. Турбокомпресор з наддувом

Удосконалення способу спалювання палива в двигуні веде, як правило, або до його меншої витрати і, відповідно, менших викидів частинок сажі, або зниження викидів оксидів азоту.

Витрата палива в тягових двигунах - важливий критерій, оскільки він вирішальною мірою впливає на витрати життєвого циклу тягового рухомого

складу. Можливості зниження викидів за допомогою цих заходів є обмеженими.

У таблиці 4.1 дано огляд подібних заходів, що забезпечують зниження викидів оксидів азоту приблизно на 30%.

Дослідження поданих у табл. 4 технічні заходи показали, що доцільним може бути їх поєднання. Спільне використання вдосконаленої технології упорскування, застосування турбонаддува та методу Міллера дозволяють досягти значних покращень.

Таблиця 4.1 – Модернізація двигуна з метою зменшення викидів оксидів азоту.

Заходи	Витрати палива	Монтажний об'єм	Маса
Система упорскування Common Rail 2 покоління	Підвищений	Без змін	
Система упорскування Common Rail з турбонаддувом	Підвищений незначно		
Упорскування суміші та води	Без змін	+40% об'єму	+50% об'єму
Метод Міллера	Підвищений незначно	Без змін	

Заходи, що не зачіпають конструкцію дизеля, передбачають усунення шкідливих речовин, що викидаються, або їх перетворення за допомогою підключених фільтрів та/або каталізаторів. На легкових автомобілях із бензиновими двигунами таке очищення вихлопних газів проводиться вже близько 20 років, а на вантажних — з моменту набуття чинності документом Euro 4.

На залізничному транспорті діють спеціальні вимоги, які необхідно враховувати при розробці та виготовленні дизелів, а саме:

- значне зниження викиду шкідливих речовин (окисів азоту, окису вуглецю, вуглеводнів та частинок сажі) за досить високої частки роботи в режимі холостого ходу;
- широкий температурний діапазон роботи тягового приводу (температура вихлопних газів від 80°C до 600°C);
- стійкість по відношенню до специфічних навантажень рухомого складу, насамперед до частої та швидкої зміни температури вихлопних газів, високих динамічних сил, що виникають внаслідок взаємодії колеса з рейкою;
- незначний протитиск вихлопу;
- тривалий термін служби та повільне старіння приводів;
- відсутність чи лише незначне підвищення витрат палива;
- незначні витрати на ремонт.

Пристрої для додаткової обробки вихлопних газів розрізняються за принципом дії, складності, типом обладнання, монтажному об'єму і масою, ступенем очищення від шкідливих речовин вихлопних газів дизеля (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Додаткова обробка викидів.

Вид додаткової обробки	Принцип дії	Обладнання	Компоненти викидів
Окислення	Каталіз	Каталізатор окислення	Вуглеводні, окис вуглецю
Фільтрація	Седиментація	Сажевий фільтр	Частинки сажі
Відновлення	Каталіз	Селективна система каталітичного осадження (SCR)	Вуглеводні, окис вуглецю, частинки сажі
Окислення і фільтрація	Каталіз та седиментація	Потоковий регенеруючий уловлювач (система CRT)	Вуглеводні, окис азоту, частинки сажі
Окислення, відновлення і фільтрація		Система SCRT - поєднання SCR та CRT	Вуглеводні, окис вуглецю, окис азоту, частинки сажі

Зниження викиду оксидів азоту та частинок сажі є при цьому найважливішою вимогою. Пізніше, після набуття чинності ступенем ІІІВ директив RL 97/68 EG, запланованого на 2025 р., на залізничному транспорті будуть застосовуватись системи додаткової обробки вихлопних газів. Для забезпечення встановлених граничних значень можна також поєднувати заходи, що виконуються в конструкції дизеля і поза нею, наприклад одночасно використовувати турбонаддув та застосовувати фільтр сажі.

Крім цього, витрати палива рухомим складом та створювані ним шкідливі викиди можна мінімізувати, якщо застосувати інноваційні приводи, що використовують енергію гальмування, інтелектуальне керування допоміжними пристроями, обладнання полегшеної конструкції. На величину викидів впливають інші чинники — конструкція низки вузлів і агрегатів рухомого складу, вид графіка руху, режим ведення поїзда, характер траси.

Так, однією з інноваційних концепцій є – гібридний привід.

Аналіз балансу енергії приводу рейкового рухомого складу показує, що можна користуватися енергією гальмування. Розподіл енергії приводу, схематично представлене на рис. 4.2 [7], переважно залежить від профілю шляху. Потенціал корисного використання енергії гальмування (рекуперації) сягає 25%.

На електрорухомому складі рекуперація здійснюється вже давно. Тут рекуперована енергія передається в живлячу систему через контактну мережу. На тепловозах та дизель-поїздах для прийому рекуперованої енергії потрібен акумулятор.

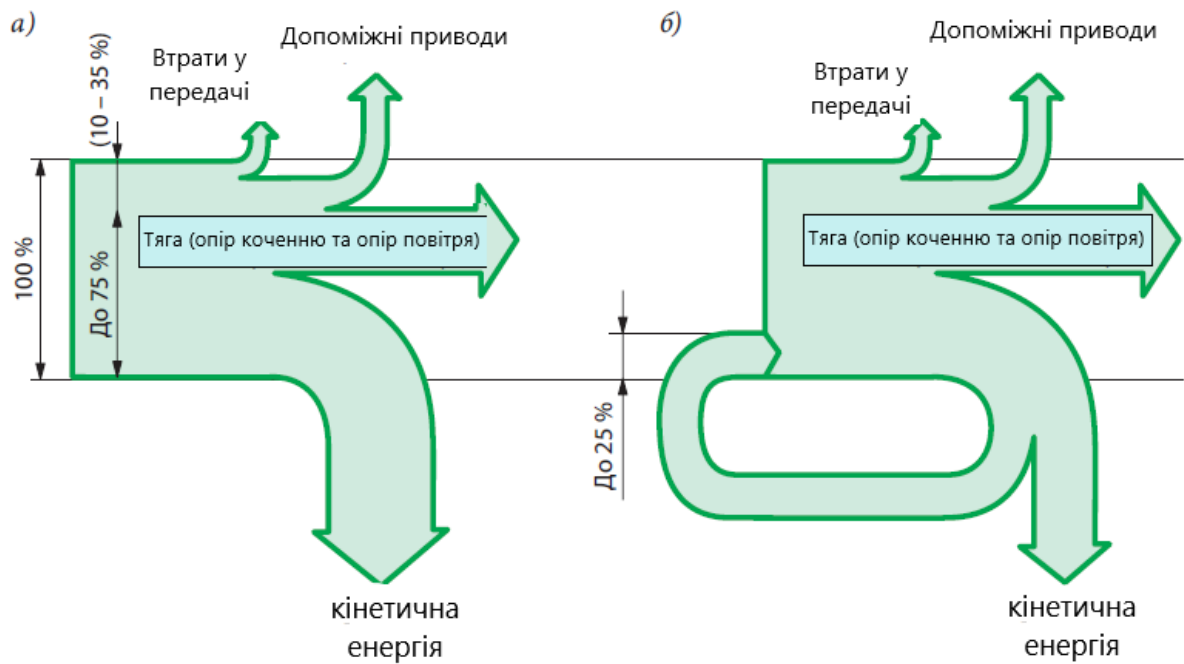


Рисунок 4.2 – Розподіл енергії тягового приводу:

а) без рекуперації; б) з рекуперацією

При поєднанні приводів кількох типів утворюється званий гібридний привід. Найбільш поширене поєднання двигуна внутрішнього згоряння та електродвигуна з акумуляторною батареєю або потужною батареєю конденсаторів. Можливе також застосування механічних чи пневматичних акумуляторів.

Гібридні приводи можуть бути паралельні та послідовні. У паралельному гібридному приводі обидва двигуни, як правило, механічно з'єднані, працюють разом, переміщуючи локомотив. При послідовному гібридному приводі двигун внутрішнього згоряння тільки обертає генератор, від якого отримує живлення електричний двигун.

Розрізняють гібридні приводи середньої та повної потужності. У першому електричний двигун, потужність якого становить 10 - 15% потужності двигуна внутрішнього згоряння, використовується для посилення крутного моменту на виході. У цьому випадку корисно використовується

підготовлена енергія, отримана в процесі гальмування, коли електрична машина працювала в генераторному режимі.

У так званому приводі повної потужності рух здійснюється лише з використанням накопиченої електричної енергії. У цьому випадку потужність електричної машини повинна становити 30-50% потужності двигуна внутрішнього згорання.

Залежно від концепції гібридного приводу та характеристик його компонентів під час експлуатації рухомого складу можуть бути застосовані нові стратегії керування приводом, що забезпечують таке:

- прибуття на станцію та відправлення поїзда без шкідливих викидів (включено лише електричні тягові двигуни);
- відключення дизеля під час зупинки на станції;
- зниження потужності двигуна внутрішнього згорання;
- можливість роботи при відмові стартера, електричного генератора бортової мережі або акумуляторної батареї;
- підвищення потужності тягового приводу для прискорення розгону;
- проходження населених зон без шкідливих викидів;
- рух на вибігу при відключеному двигуні внутрішнього згорання.

Існують різні міркування та концептуальні ідеї щодо створення рухомого складу з декількома видами приводів та акумуляторами відповідно до розглянутої архітектури.

При оснащенні діючого рухомого складу гібридним приводом слід дотримуватися балансу мас і брати до уваги монтажні простори, що є в розпорядженні.

Управління допоміжним обладнанням. У пасажирських перевезеннях близько 25% енергії, що споживається тяговим рухомим складом з дизельними

двигунами, витрачається на живлення допоміжного обладнання та пристроїв для забезпечення необхідного рівня комфорту. Сюди відносяться прилади опалення, що живляться від бортової системи електропостачання, компресори для систем кондиціонування повітря та вентиляції, а також вентилятори та насоси системи охолодження. Управління живленням цього устаткування нині здійснюється у обмежених масштабах. Потреба енергії та вибір цих пристроїв визначаються, як правило, максимальною потужністю.

Аналіз тривалості роботи окремих одиниць обладнання показав, що максимальна потужність залежно від пори року використовується лише протягом 30 – 60% часу їхньої роботи. Поєднання інтелектуальної системи регулювання та гібридного приводу з накопичувачем енергії відкриває нові можливості для управління роботою допоміжного обладнання:

- живлення допоміжного обладнання енергією, що надходить від електричного тягового двигуна, що працює при гальмуванні в генераторному режимі, або від накопичувача електричної енергії (локальне вилучення шкідливих викидів);
- використання при пікових навантаженнях енергії, що накопичена в накопичувачі;
- відключення генератора бортової мережі;
- компаундування (змішане включення) окремих одиниць допоміжного обладнання;
- регулювання часу ввімкнення відповідно до режиму руху та рівня заряду акумулятора;
- підтримка режиму опалення або кондиціонування вагонів у відстої при вимкненому дизелі.

Завдяки перерахованим заходам зменшення викидів двоокису вуглецю та шкідливих речовин рухомим складом може досягати 10%.

## 4.2. Технології використання альтернативних палив.

Як відомо, запаси копалин енергоносіїв, наприклад нафти та вугілля, обмежені, тому необхідно шукати альтернативи традиційним енергоресурсам — бензину, дизельному паливу та гасу.

*Підвищення ефективності роботи тепловозів переведенням їх на скраплений нафтовий газ.*

На основі результатів аналізу виконаних робіт з використання зрідженого нафтового газу в дизельних двигунах можна зробити наступні висновки:

- зріджений нафтовий газ як паливо для дизелів рухомого складу має значну сировинну та ресурсну базу;

- при переведенні тепловозів на цей вид палива істотно покращуються експлуатаційні якості двигунів, зменшується викид токсичних речовин, збільшується міжремонтний термін служби дизелів за рахунок зменшення зносу деталей циліндропоршневої групи та паливної апаратури дизелів;

- найперспективнішим способом модернізації дизелів тепловозів до роботи на зрідженому нафтовому газі є застосування методу безпосереднього упорскування. Однак для цього недостатньо відпрацьовані схеми паливоподачі, що забезпечують надійний пуск та стійку роботу;

- для різних типів дизелів рекомендовані часто суперечливі співвідношення складу паливних сумішей та високооктанових присадок;

- недостатньо вивчені питання вибору способу сумішоутворення та поліпшення займистості палива (підвищення октанового числа).

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити багато завдань: виконати якісний і кількісний аналіз можливостей і умов для збереження на тепловозі суміші дизельного палива та зрідженого нафтового газу; запропонувати технологію використання суміші дизельного палива та зрідженого нафтового

газу для дизелів тепловозів, що забезпечує покращення експлуатаційних показників та зниження витрат на паливо; дослідити та визначити ступінь впливу складу паливної суміші на експлуатаційні характеристики дизелів тепловозів; розробити математичну модель для оцінки експлуатаційних показників дизелів тепловозів при роботі на дизельному паливі, зрідженому нафтовому газі та його сумішах з дизельним паливом та присадками; - обґрунтувати та запропонувати критерій оцінки ефективності роботи дизелів тепловозів на альтернативних видах палива.

*Критерій оцінки ефективності використання палива як скрапленого газу.*

Зважаючи на відсутність стандартної методики в частині визначення ефективності застосування зріджених газів як для економії дизельного палива, так і для одночасного зниження шкоди, заподіяної забрудненням навколишнього середовища в районі експлуатації тепловозів, комплексну (узагальнену) оцінку енергоекологічних показників роботи тепловоза пропонується оцінювати на основі аналізу системи «тепловоз – скраплений нафтовий газ – навколишнє середовище».

Враховуючи причинно-наслідкові зв'язки, як критерій оцінки ефективності використання палива, запропоновано комплексний показник  $K_{\Sigma}^{ec}$ :

$$K_{\Sigma}^{ec} = \eta_{вп} \eta_c^{cm} K_{Ti}, \quad (4.1)$$

де  $\eta_{вп}$  - ККД виробництва зріджених газів,

$$\eta_{вп} = Q_b^п / (Q_b^H + Q_{сж}^п + Q_{сж}^{екс}), \quad (4.2)$$

$Q_b^п$ ,  $Q_b^H$ ,  $Q_{зр}^п$ ,  $Q_{зр}^{екс}$  – відповідно вища теплота згорання корисної частини палива зріджених газів та вихідного матеріалу (підготовленої до перегонки

нафти), енергія, еквівалентна витратам на виробництво зріджених газів та на експлуатацію установки з виробництва сумішевого палива;  $\eta_{\text{e}}^{\text{CM}}$  - ефективний ККД дизеля при роботі на зріджених газах (або на його сумішах з дизельним паливом та присадками):

$$\eta_{\text{e}}^{\text{CM}} = 3600 p_{\text{э}} / g_{\text{i}} * Q_{\text{H}} * p_{\text{i}} \quad (4.3)$$

де  $g_{\text{i}}$ ,  $Q_{\text{H}}$ ,  $p_{\text{э}}$ ,  $p_{\text{i}}$  - відповідно індикаторна витрата палива дизелем, нижча теплота згоряння палива або суміші, що використовується, середній ефективний та індикаторний тиск в циліндрі дизеля;

$K_{\text{t}}$  - коефіцієнт зниження токсичності по  $i$ -го компоненту шкідливих викидів дизеля (альдегіди,  $\text{NOx}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$ , сажа), який оцінюється:

$$K_{\text{t}_i} = 1 + [(C_{\text{i}_1} - C_{\text{i}_2}) / C_{\text{i}_1}] \quad (4.4)$$

де  $C_{\text{i}_1}$ ,  $C_{\text{i}_2}$  - концентрації  $i$ -го компонента при роботі дизеля на зріджених газах або його суміші з дизельним паливом та присадкою.

Узагальнюючи формули (4.1) - (4.4), можна отримати остаточний вираз для оцінки енерго-екологічного критерію роботи дизеля на паливній суміші у вигляді:

$$K_{\Sigma}^{\text{ec}} = [(1-\beta) * \eta_{\text{вп}} + \beta \eta_{\text{e}}^{\text{CM}}] * \eta_{\text{e}}^{\text{CM}} [1 + (C_{\text{i}_1} - C_{\text{i}_2}) / C_{\text{i}_1}] * 100\% \quad (4.5)$$

де  $\beta$  - масова частка конденсату в продуктах згоряння палива чи суміші.

Даний критерій склав 31,1% і 33,7% при роботі на дизельному паливі і суміші СЗГ з дизельним паливом відповідно, що вказує на кращі економічні та екологічні показники при використанні суміші СЗГ і дизельного палива.

### *Технологія заміщення дизельного палива природним газом*

Ефективним методом покращення показників є використання компримованого природного газу (КПГ) як добавка до дизельного палива [19]. Експлуатація маневрових тепловозів характеризується частою зміною

режимів роботи та застосування зрідженого природного газу (ЗПГ) неможливо через інерційність газифікатора, тому для них доцільно застосовувати КПГ.

Змішування КПГ з дизельним паливом дозволяє покращити якість розпилу та згоряння сумішевого палива шляхом додаткового руйнування його паливного струменя за рахунок виділення природного газу при перепаді тиску, що сприяє більш тонкому та однорідному розпорошенню з безліччю початкових вогнищ займання. В результаті згоряння природного газу в повному обсязі відбувається підвищення тиску та температури, що позначається на руйнуванні паливного струменя.

Для вирішення проблеми підвищення енергоекономічних та екологічних показників дизелів тепловозів при подачі газу до дизельного палива шляхом організації робочого циклу за принципом внутрішнього сумішоутворення виходячи з переваг простоти переобладнання розроблено спеціальні системи подачі, змішування та дозування природного газу [22-29].

Варіюючи складом палива шляхом зміни вмісту природного газу в діапазоні від 1 до 90 % від загальної кількості палива, що подається, розраховуються параметри подачі сумішевого палива з урахуванням коефіцієнта компонентного складу  $K_0$  природного газу. Таким чином, при заміщенні дизельного палива природним газом теплотворна здатність сумішевого палива зростає, тому дійсна об'ємна подача газу повинна бути знижена приблизно на 10%. Причиною цього є відмінність у теплотворній здатності дизельного палива та природного газу.

Так, залежності питомої ефективної витрати дизельного палива для дизеля 6ЧН31/36 при заміщенні дизельного палива природним газом сягають 5%. Питома ефективна витрата дизельного палива ( $b_e$ ) знизилася в середньому на 8-12% залежно від режиму роботи дизеля.

Частка метану у складі газу може змінюватися у широкому діапазоні, тобто від 75 до 99 %. У зв'язку існують спеціальні методики розрахунку теплоти, що виділилася при згоранні сумішевого палива з урахуванням

компонентного складу природного газу, що дозволяє отримати оптимальні показники роботи дизелів тепловозів. При розрахунку сумарної кількості тепла, підведеного при згорянні сумішевого палива, враховується вплив концентрації метану в природному газі різних родовищ та коефіцієнт компонентного складу  $K_0$ , величина якого емпірично оцінена, за результатами обробки протоколів випробувань.

Рівняння для визначення відносної кількості тепла, що виділилося при згорянні сумішевого палива з урахуванням коефіцієнта компонентного складу  $K_0$  має вигляд:

$$q = \frac{G_T \cdot H_{уд}}{(K_0 \cdot V_{III} \cdot H_{уIII} + G_T \cdot H_{уд})}, \quad (4.6)$$

де  $K_0 = f(H_u)$  - коефіцієнт компонентного складу;

$G_T$  - витрата палива дизелем, м<sup>3</sup>/годину;

$H_{уд}$  – нижча теплотворність дизельного палива, МДж/м<sup>3</sup>;

$H_{уIII}$  - нижча теплотворність природного газу, МДж/м<sup>3</sup>;

$V_{III}$  – наведена годинна витрата природного газу, м<sup>3</sup>/годину.

На холостому ходу дизель працює за дизельним циклом, оскільки процес згоряння природного газу нестабільний (невисокі температури та тиску робочого циклу). Збільшення ефективної потужності дизеля в залежності від режиму роботи сягає в середньому на 2-4% при подачі природного газу до дизельного палива, не перевищуючи межі паспортних значень, закладених конструкцією дизеля.

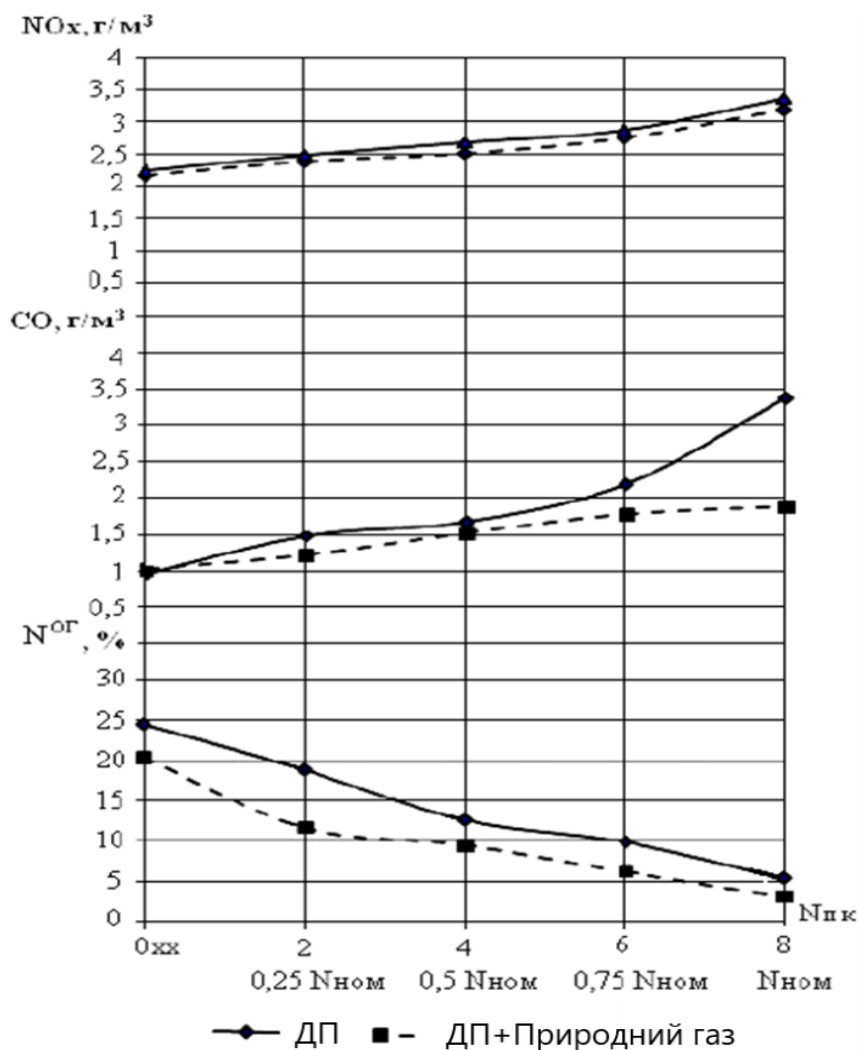


Рисунок 4.3 – Екологічні характеристики дизеля 6ЧН31/36 при роботі на сумішевому паливі

Аналіз залежностей, представлених на рисунку 4.3 показує, що при 5% заміщенні дизельного палива природним газом в залежності від номінальної потужності дизеля спостерігається зниження шкідливих викидів: оксидів вуглецю (CO) в середньому на 6-8%, оксидів азоту ( $NO_x$ ) в середньому на 4-6%, а димності відпрацьованих газів ( $N_{or}$ ) у середньому на 5-10% [19].

Як визначальний параметр у механізмі впливу природного газу на енергоекономічні та екологічні показники роботи дизеля тепловоза приймають відношення Н/С.

### 4.3. Експлуатаційні заходи, що знижують шкідливі викиди.

Будь-яке зменшення споживання енергії на залізничному транспорті автоматично веде до зниження шкідливих викидів. Таким чином, економія енергії на потяг стає засобом, що дозволяє в короткостроковій перспективі досягти відповідного успіху щодо викидів. Цьому сприяють також навчання машиністів, візуалізація, реєстрація та оцінка витрат палива.

Значний внесок можуть зробити технічні пристрої, які допомагають машиністу, - так звані асистент-системи.

Одна з них, а саме система ESF забезпечує енергозберігаючий режим ведення поїзда [7]. У разі сприятливого становища локомотива у графіку руху можна відключити тягу на перегоні та використовувати рух поїзда на вибігу, тобто за рахунок інерції. Це дозволяє заощаджувати значну кількість енергії до повторного включення тяги або до початку процесу гальмування без помітного збільшення тривалості подорожі.

Система ESF забезпечує машиніста інформацією про положення поїзда у графіку та рекомендований момент переходу в режим вибігу.

На DB до складу цієї системи входить електронний розклад руху поїздів (EBuLa) [7]. Основний принцип технічної реалізації системи та необхідні для неї вхідні дані показані на рис. 4.4.

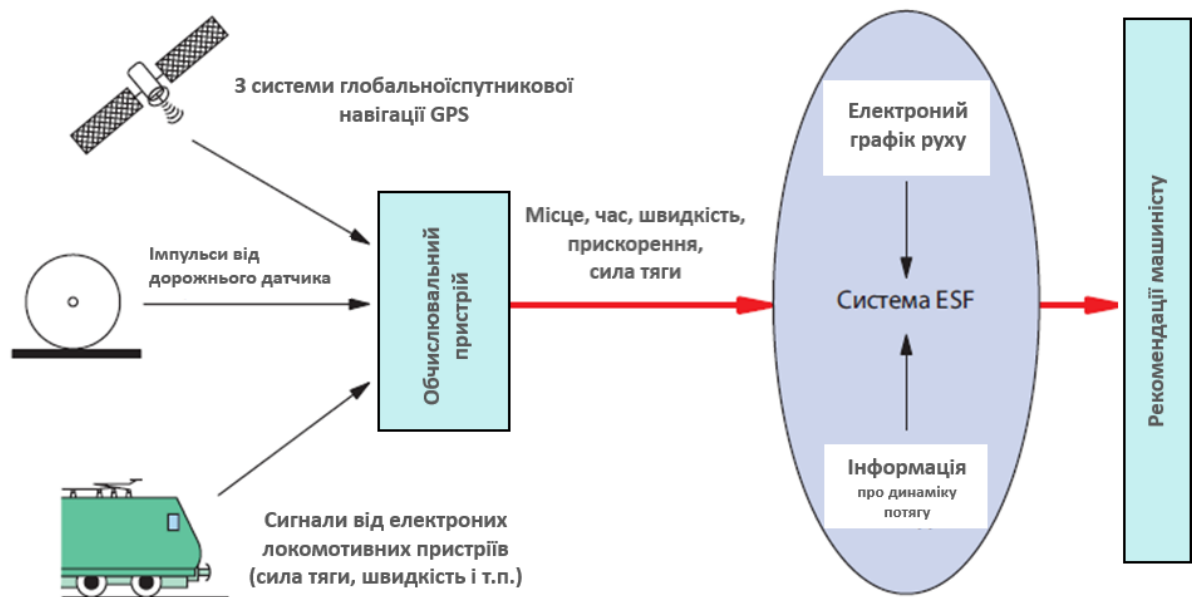


Рисунок 4.4 - Принцип дії системи ESF, що встановлюється в локомотиві

Таким чином, у розпорядженні машиніста з'явилася система-помічник, яка ефективно доповнює його досвід та накопичені практичні знання. Вона забезпечує енергооптимальне ведення поїзда, швидко реагуючи на порушення, що виникають, тобто своєчасно передає машиністу інформацію та відповідні рекомендації.

Ще одним ефективним засобом зниження витрати пального є проект FreeFloat DB [7], орієнтований на інтегральну оптимізацію інфраструктури, графіка руху та методів експлуатації, а також на гнучкий збут транспортних послуг. Тут у центрі уваги знаходяться графік руху поїздів та ефективність регулювання парку вагонів.

Спеціальні інструментальні засоби DisKon та Zuglaufregler забезпечують оптимальне використання залежно від умов експлуатації резервів часу в графіку, знижують ймовірність запізнення поїздів і помітно сприяють енергозбереженню в процесі руху поїзда. На локомотив можна, наприклад, передавати інформацію про актуалізацію графіка руху (так зване регулювання графіка), завдяки чому наступні поїзди можуть бути проведені з меншою витратою енергії на тягу.

У останні роки ДВ постійно знижували шкідливі викиди, створювані тепловозною тягою, реалізуючи різні технічні та експлуатаційні заходи.

Потенціал зниження шкідливих викидів далеко ще не вичерпаний. Цілком можливі подальші покращення, спрямовані на захист клімату або підвищення конкурентоспроможності залізниць.

Поруч із автомобільних перевезеннях спостерігається прагнення заміни приводу автомобіля: промисловість нині дедалі більше уваги приділяє електричному приводу.

Більшість залізничних перевезень протягом десятиліть здійснюється на електричній тязі. Разом з тим, повна електрифікація федеральної залізничної мережі Німеччини неможлива з міркувань економічної ефективності. Для частини промислових підприємств, а також у колійних роботах на залізниці та в майбутньому доведеться використовувати тяговий рухомий склад, який отримує харчування не від контактної мережі.

Створення рухомого тягового складу або його окремих компонентів, що забезпечують роботу без шкідливих викидів, є першочерговим завданням залізничного машинобудування. При цьому слід поряд із колишньою установкою на оптимізацію дизелів переходити до розгляду загальних проблем залізничного транспорту, включаючи вплив на витрати енергоресурсів на якість інфраструктури, у тому числі системи тягового електропостачання.

При вдосконаленні рухомого складу промисловість, однак, має спиратися на знання та досвід компаній операторів. Це може бути особливо корисним при випробуваннях технологічних систем та компонентів, що забезпечують підвищення енергоефективності та зниження шкідливих викидів в умовах, близьких до експлуатаційних.

DB разом з провідними компаніями-виробниками рухомого складу розробили ефективну концепцію Центру нових технологій приводів та зниження шкідливих викидів (DB Eco Center).

Його програма ґрунтується на питаннях створення екологічних систем приводу для залізничного рухомого складу. До складу цього центру увійшли такі найбільші компанії, як Alstom, Bombardier, Siemens [7].

Отже, аналіз заходів щодо зменшення викидів від тепловозних двигунів дозволяє сформулювати наступні висновки:

1. Зменшення кута випередження упорскування призводить до зниження  $\text{NO}_x$  на 50-70%, але при цьому відбувається збільшення вмісту  $\text{CO}$  у вихлопі, зростає витрата палива, знижується на 5-7% ефективна потужність дизеля.
2. Рециркуляція відпрацьованих газів дає зниження  $\text{NO}_x$  на 50-70%, зниження витрати палива, але при цьому зростає вміст у вихлопі сажі на 50%, вміст  $\text{CO}$ , вуглеводнів та знижується потужність.
3. Охолодження свіжого заряду призводить до зниження  $\text{NO}_x$  на 20-40%, але одночасно збільшення вмісту  $\text{CO}$  на 15-20%. Дроселювання повітря на впуску надає лише незначний вплив на токсичність газів, що відпрацьовали.
4. Присадка води до робочої суміші (застосування водопаливних емульсій) дозволяє знизити  $\text{NO}_x$  до 40% і одночасно на 4-5% зменшити витрату палива. Крім того, присадка води веде до збільшення вмісту у вихлопі  $\text{CO}$ , вуглеводнів та сажі до 20%.
5. Застосування антидимних присадок (Smoke Supersant Additive) призводить до зниження на 50% вмісту сажі і на 10% бензапірену, зниження витрати палива на 9-15%, але дає збільшення викиду шкідливого для навколишнього середовища оксиду барію.

6. Попереднє насичення палива повітрям забезпечує зниження викидів сажі та СО (відповідно на 70 і 30%), але при цьому зростають викиди  $\text{NO}_x$  на 15%.
7. Застосування присадок синтетичних спиртів призводить до зниження  $\text{NO}_x$  на 30-40%, - на 40%,  $\text{O}_2$  - на 15-20%, але ускладнює конструкцію двигуна і тепловоза.
8. Застосування газового палива веде до зниження вмісту у вихлопних газах  $\text{NO}_x$  на 50%, вуглеводнів - на 30%, СО - на 70%, але також ускладнить конструкцію, підвищує пожежну небезпеку і ускладнює, як показує досвід, холодний запуск двигуна.
9. Застосування нейтралізаторів призводить до зниження СО, вуглеводнів і сажі, але при цьому спостерігається низька ефективність роботи дизеля на малих навантаженнях, знижується на 5-10% потужність двигуна, і збільшується на 5-7% витрата палива, а також збільшуються експлуатаційні витрати.
10. Використання водопаливної емульсії з двадцятивідсотковим вмістом води сприяє зниженню викиду окису вуглецю в 1,3 - 1,7 рази, оксидів азоту  $\text{NO}_x$  - до 2-х разів. При цьому зменшення частки викиду оксиду вуглецю і окислів азоту  $\text{NO}_x$  пропорційно вмісту води та емульсії.

## ВИСНОВКИ

Аналіз теоретичних та практичних досліджень у галузі експлуатації та ремонту тепловозних дизелів показав, що наразі питанням екологічної безпеки тепловозних дизелів приділяється недостатньо уваги. Однією з причин цього слід вважати складність оцінки економічної шкоди, яку завдають відпрацьовані гази транспортних, двигунів навколишньому середовищу та здоров'ю населення. Величина відрахувань локомотивних депо на охорону навколишнього середовища, пропорційна кількості спаленого палива, не стимулює працівників депо вдосконалювати систему ремонту та налаштування тепловозів з метою скорочення кількості шкідливих викидів у газах, що відпрацьовали.

Слід зазначити, що широке застосування засобів контролю екологічного впливу тепловозних дизелів на навколишнє середовище стримується відсутністю вітчизняних газоаналізаторів невисокої вартості з низькими експлуатаційними витратами.

Очевидно, з урахуванням економічної ситуації, що склалася сьогодні, найбільш прийнятним способом оцінки екологічних характеристик дизелів є методи математичного моделювання, що дозволяють вирішити це завдання з використанням математичних моделей, що базуються на результатах реостатних штатних випробувань тепловозів.

Використання таких методів дозволить налаштувати тепловоз з урахуванням переважних позицій контролера машиніста в умовах поїзної роботи, мінімуму витрат палива та кількості шкідливих викидів.

Розрахунок кількості шкідливих викидів у газах, що відпрацьовали, повинен проводитися за відомими значеннями обсягу, тиску, температури і закону вигорання палива в циліндрі дизеля, тобто необхідна індикаторна діаграма робочого циклу двигуна (циліндра двигуна) і методика її обробки, що дозволяють визначити названі параметри робочого циклу.

В даний час в умовах депо відсутні системи дизеля, відсутні також методи обробки результатів індикування. Одним з альтернативних рішень цієї

проблеми є варіант розрахунок параметрів робочого циклу дизеля та побудова індикаторної діаграми з використанням математичної моделі, в якій процес вигорання палива, зміна температури та тиску при згорянні розраховуються згідно із законом, запропонованим І.І. Вйбе. Цей закон відомий у теорії двигунів з 1962 року і використовується для розрахунку процесу вигорання палива при проектуванні двигунів, але для виконаних (серійних) двигунів метод його реалізації не застосовувався дотепер.

В результаті аналізу широкого кола вітчизняних та закордонних наукових досліджень у сфері екологізації тепловозних дизельних двигунів можна зробити наступні висновки:

1. На підставі аналізу багатьох досліджень щодо контролю кількості шкідливих викидів у відпрацьованих газах транспортних двигунів встановлено, що основними засобами для визначення кількості шкідливих викидів є газоаналізатори різних моделей, які контролюють вміст у відпрацьованих газах лише оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), окису вуглецю ( $\text{CO}$ ), оксидів сірки ( $\text{SO}_x$ ) і димність, за якою проводиться розрахунок вмісту вогню, що не згорів (сажі).

Використання газоаналізаторів в умовах локомотивних депо збільшує трудомісткість реостатних випробувань, їх тривалість, збільшує величину основних та експлуатаційних витрат, пов'язаних з обладнанням пунктів екологічного контролю, вартістю газоаналізаторів та відповідних датчиків; обслуговуванням та періодичним контролем газоаналізаторів.

Термін служби датчиків визначається частотою використання газоаналізатора під час налаштування тепловоза.

Слід зазначити, що в даний час відсутні аналітичні методи оцінки кількості шкідливих викидів у відпрацьованих газах транспортних двигунів, що працюють на вуглеводневих паливах різного елементарного складу, які б дозволили оперативно, з використанням сучасної обчислювальної техніки, контролювати ступінь екологічного впливу тепловозів на навколишнє середовище залежно від якості їхнього налаштування.

2. Найбільш простими та перспективними методами оцінки екологічних характеристик дизелів є методи математичного моделювання, що дозволяють вирішити це завдання з використанням математичних моделей. Математичні моделі можуть бути корисними і при обробці результатів індикування тепловозних дизелів.

3. Аналіз технологій зниження кількості шкідливих викидів з відпрацьованими газами транспортних дизелів показав, що в даний час основними методами є: застосування випалювачів палива, нейтралізаторів шкідливих викидів і сажевих фільтрів різної конструкції, застосування альтернативних палив і паливоводяних емульсій і т.д. Постійне вдосконалення названих методів свідчить про недостатню їхню ефективність з причин: впливу названих технологій на параметри робочого процесу та надійність дизеля; ускладнення конструкції систем дизеля; необхідність відновлення, робочих характеристик, застосовуваних пристроїв та пристроїв для очищення газів, що відпрацьовали; високої вартості впровадження та використання названих технологій.

4. Одним із шляхів зниження екологічного впливу тепловозів на навколишнє середовище є метод налаштування паливної апаратури дизелів на мінімум витрати палива на переважних позиціях контролера машиніста. Так, для маневрових локомотивів серії ТЕМ2, які працюють в основному на холостому ході та малих навантаженнях, доцільно змінити кут випередження подачі палива з 29 °п.к.в. до ВМТ до 23 - 24 °п.к.в., що дозволить зменшити кількість сажі і сірки приблизно на 2,78 відсотка.

Одночасна зміна кута випередження подачі палива та ступеня стиснення в межах технологічних допусків (модельні розрахунки для тепловозів ЧМЕЗ) підтверджують, що підвищення ступеня стиснення призводить до збільшення окису вуглецю та оксидів азоту у відпрацьованих газах дизеля на проміжних режимах. Працюючи на номінальному режимі кількість CO, NO і NO<sub>2</sub> зменшується при постійному куті випередження подачі палива. Збільшення кута випередження подачі палива при незмінному ступені стиснення призведе

до збільшення кількості CO, NO і NO<sub>2</sub> у газах, що відпрацювали при роботі його на проміжних позиціях, при одночасному зменшенні кількості вуглецю (сажі).

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Двигуни внутрішнього згорання: Серія підручників у 6 томах. Т.5. Екологізація ДВЗ. – 2-е видання / За редакцією проф. А.П. Марченка. – Х.: Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 2014. – 348 с.
2. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://info.uz.ua/news/evgenkravtsov-ukrzaliznitsya-otrimae-vid-general-electric-naybilshu-partiyu-teplovoziv-za-chasiv-nezalezanoi-ukraini>
3. Association Agreement between the European Union and the European Atomic Energy Community and their Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part, Kiev, March 2014, 277 p. — Access mode: <http://www.consilium.europa.eu/en/documents-publications/agreements-conventions/agreement/?aid=2014045> (Ukr.)
4. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), 119 p. — Access mode: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>
5. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants, 21 p. — Access mode: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0080>
6. Бахтиярова, Д. С., Омарова, Б. К., Хасенов, Е.Т., Каракаев, А. К. Проблемы использования нетрадиционного топлива в дизелях // Наука и техника Казахстана. - № 1-2. - 2012. - С. 29-37.
7. За матеріалами інституту IFEU ([www.ifeu.de](http://www.ifeu.de)) та компанії MTU ([www.mtu-online.com](http://www.mtu-online.com)); європейські стандарти з вихлопів дизелів ([www.dieselnat.com](http://www.dieselnat.com)); ZEVrail, 2010 № 3, S. 76 - 84.
8. Визначення кількості шкідливих викидів тепловозними двигунами внутрішнього згорання М.І. Капіца, М.І. Мартишевський, Ю.В. Зеленько та інш. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні

- системи і технології», 2019. Вип.33. Т.1, с.130-143, DOI: 10.32703/2617-9040-2019-33-1-12.
9. Сенько В.І. Електроніка і мікросхемотехніка. Елементна база електронних пристроїв: Підручник у 4-х томах / В.І. Сенько, за ред. В. І. Сенька. Т.1. – К.: Обереги, 2000. – 300 с.
  10. Дисертація. Денис І.В. «Покращення динамічних показників роботи гібридного тепловозу з вентильно-індукторним приводом». Режим електронного доступу: <https://files.duit.edu.ua/uploads/92.pdf>
  11. Wikipedia. Цикл Дізеля. Режим електронного доступу <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
  12. «Про затвердження Інструкції про порядок обчислення та сплати збору за забруднення навколишнього природного середовища» – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/z0544-99>
  13. Наказ Держкомстату України від 13.11.2008 р. N 452 «Про затвердження Методики розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів»
  14. Екологічний податок. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://biznes.km.ua/onenews/Ekologichnij-podatok.html>.
  15. Забруднення повітря. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.unian.ua/ecology/zabrudnennya-povitrya-shche-nebezpechnishe-dlya-zdorov-ya-lyudini-nizh-vvazhalosya-vooz-11556505.html>
  16. Stawecki W., Marciniak Z., Pielecha I., Pielecha J.: Problems of exhaust gas emission of modernized diesel locomotives operating in Poland, Combustion Engines 1/2014, pp. 48–58
  17. Szelağ A., Maciołek T.: Rozwiązania techniczne w układach zasilania poprawiające efektywność energetyczną transportu szynowego, Pojazdy Szynowe 3/2015

18. Conway, R. NO<sub>x</sub> and PM Reduction Using Combined SCR and DPF Technology in Heavy Duty Diesel Applications / R. Conway [et al.] // SAE Paper. 2005. № 2005-01-3548.
19. Dissertaciya Kurmanova – [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/dissertaciya\\_kurmanova.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/dissertaciya_kurmanova.pdf)
20. Denys I. Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor / S. Buriakovskiy, A. Maslii, O. Pasko, I. Denys // Transport Problems. – 2018. – №13/2. – С. 69-80.
21. Денис І. В. Дослідження режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ на імітаційній моделі / С.Г. Буряковський, А. С. Маслій, В. В. Панченко, Д.П. Помазан, І. В. Денис // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – №2018/2. – С. 59-63
22. Hirata, K. Development of Urea-SCR System for a Heavy-Duty Commercial Vehicles / K. Hirata, [et al.] // SAE Paper. 2005. № 2005-01-1860.
23. Walker, A.P. The Development and In-Field Demonstration of Highly Durable SCR Catalyst Systems / A.P. Walker [et al.] // SAE. 2004. № 2004-01-1289.
24. Havenith, C. Transient Performance of a Urea DeNO<sub>x</sub> Catalyst for Low Emissions Heavy-Duty Diesel Engines / C. Havenith, R.P. Verbeek // SAE Paper. 1997. № 970185.
25. Pfeifer, A. U.S. 2007 - Which Way to Go? Possible Technical Solutions / A. Pfeifer, M. Krueger, D. Tomazic // SAE Paper. 2003. № 2003-01-0770.
26. West, B. In-Cylinder Production of Hydrogen During Net-Lean Diesel Operation / B. West [et al.] // SAE Paper. 2006. № 2006-01-0212.
27. Satokawa, S. Promotion Effect of H<sub>2</sub> on the Low Temperature Activity of the Selective Reduction of NO by Light Hydrocarbons over Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / S. Satokawa [et al.] // Applied Catalysis B: Environmental. 2003. 42. P. 179–186.
28. Kirwan, J. E. Advanced Engine Management Using On- Board Gasoline Partial Oxidation Reforming for Meeting Super-ULEV (SULEV) Emissions

- Standards / J. E. Kirwan, A. A. Quader, M. Grieve // SAE Paper. 1999. № 1999-01-2927.
29. Kirwan, J. E. Fast Start-Up On-Board Gasoline Reformer for Near Zero Emissions in Spark-Ignition Engines / J. E. Kirwan, A. A. Quader, M. Grieve // SAE Paper. 2002. № 2002-01-1011.
30. Frank B., Emig G., Renken A. Appl. Catal. B. 19, 45, 1998.
31. Burch R., Coliman M.D.. Appl. Catal. B. 23, 115, 1999.
32. Ueda, T. Nakao, M. Azuma, T. Kobayashi. Catal. Today. 45, 135, 1998.
33. Setten, B., Makkee, M., Moulijn, J. Science and technology of catalytic diesel particulate filters // Catalyses reviews. - 2001. - № 43. - P. 489-564.

## СПИСОК РИСУНКІВ

1. Рисунок 1.1 – Викиди оксидів азоту (а) та сажі (б) від вантажного транспорту.
2. Рисунок 1.2 – Викиди оксидів азоту (а) та сажі (б) від пасажирського транспорту приміського сполучення
3. Рисунок 1.3 – Викиди оксидів азоту (а) та сажі (б) від пасажирського транспорту далекого сполучення
4. Рисунок 1.4 – Динаміка шкідливих викидів від дизельної тяги на DB (Німеччина) за 15 років.
5. Рисунок – 1.5 - Зміна показників роботи силової установки тепловоза в перехідному процесі:
6. Рисунок 4.1. Турбокомпресор з наддувом
7. Рисунок 4.2 – Розподіл енергії тягового приводу
8. Рисунок 4.3 – Екологічні характеристики дизеля 6ЧН31/36 при роботі на сумішевому паливі
9. Рисунок 4.4 - Принцип дії системи ESF, що встановлюється в локомотиві

## **СПИСОК ТАБЛИЦЬ**

1. Таблиця 2.1 - Приклад розрахунку сумарної маси викидів вуглецю дизелем 10Д100 за контрольований бюджет робочого часу.
2. Таблиця 4.1 – Модернізація двигуна з метою зменшення викидів оксидів азоту.
3. Таблиця 4.2 – Додаткова обробка викидів.