

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Середюк Богдан Ігорович

УДК 628.16:662.613.1
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Технології скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій.
(назва роботи)

Технології захисту навколишнього середовища
(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ Середюк Богдан Ігорович
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Яцишин Теодозія Михайлівна, д. т. н., професор
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ
2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут нафтогазової інженерії
Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці
ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую

Зав. кафедри ТЗБП

Галина Грицуляк _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

“ ____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Середюк Богдан Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Технології скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій.»

керівник роботи Яцишин Теодозія Михайлівна, д. т. н., професор
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від “ ____ ” _____ 20__ р. №

2 Термін здачі закінченої роботи “ ____ ” _____ 2026 р.

3 Вихідні дані до роботи

Вихідні дані до роботи: наукові та нормативно-правові джерела з питань охорони атмосферного повітря; матеріали щодо впливу автотранспорту на якість міського довкілля; дані про основні забруднювальні речовини у викидах транспортних засобів; статистичні та аналітичні матеріали щодо транспортного навантаження в містах; результати оцінювання екологічних ризиків і напрями впровадження технологій скорочення викидів автотранспорту.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: вступ; теоретичні основи впливу автотранспорту на стан міського довкілля; аналіз стану забруднення атмосферного повітря автотранспортом у міських територіях; оцінка екологічних ризиків від транспортних викидів; технології та заходи скорочення викидів автотранспорту в містах; висновки; перелік використаних джерел; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу: таблиці з характеристикою забруднювальних речовин автотранспорту, показниками транспортного навантаження та заходами скорочення викидів; схеми організації природоохоронних заходів; графіки, діаграми та ілюстративні матеріали за результатами аналізу.

Календарний план виконання бакалаврської роботи

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	<u>ВСТУП</u>		
2	РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи впливу автотранспорту на стан міського довкілля.....		
3	РОЗДІЛ 2. Аналіз стану забруднення атмосферного повітря автотранспортом у міських територіях		
4	РОЗДІЛ 3. <u>Експериментальна частина. Оцінювання викидів автотранспорту в м. Івано-Франківську..</u>		
5	РОЗДІЛ 4. Технології та заходи скорочення викидів автотранспорту в містах.		
6	ВИСНОВКИ		
7	ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА ДОДАТКИ		

Студентка _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота на тему «Технології скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій» присвячена дослідженню впливу автомобільного транспорту на стан атмосферного повітря урбанізованих територій та обґрунтуванню комплексу заходів, спрямованих на зменшення транспортного забруднення. Робота виконана за освітньо-професійною програмою «Технології захисту навколишнього середовища» спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

Актуальність теми зумовлена тим, що автотранспорт є одним із найпоширеніших і найдинамічніших джерел забруднення атмосферного повітря в межах міських територій. Зростання кількості приватних автомобілів, інтенсивності руху, частоти заторів, розширення дорожньої інфраструктури та збільшення площ паркування призводять до підвищення екологічного навантаження на атмосферне повітря, ґрунти, зелені насадження та здоров'я населення. Особливістю транспортного забруднення є те, що джерела викидів розміщені безпосередньо в зоні життєдіяльності людей - поблизу житлової забудови, навчальних закладів, лікарень, громадських просторів, парків, зупинок громадського транспорту та місць масового перебування населення.

Автотранспорт створює комплексний вплив на міське середовище. Його негативна дія проявляється не лише через вихлопні гази, а й через невихлопні джерела забруднення: зношування шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття, повторне піднімання дорожнього пилу, витіки паливно-мастильних матеріалів, шумове та вібраційне навантаження. У зв'язку з цим скорочення викидів автотранспорту є важливою умовою підвищення екологічної безпеки міст, покращення якості атмосферного повітря та створення комфортного міського середовища.

Метою бакалаврської роботи є дослідження впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря в межах міських територій та обґрунтування

технологій і заходів, спрямованих на скорочення транспортних викидів і підвищення екологічної безпеки міського середовища.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання: розглянуто теоретичні основи впливу автотранспорту на стан міського довкілля; охарактеризовано основні забруднювальні речовини у викидах транспортних засобів; проаналізовано вплив транспортних викидів на здоров'я населення та міські екосистеми; досліджено нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту; охарактеризовано міську транспортну систему як чинник екологічного навантаження; здійснено оцінку транспортного навантаження на окремих ділянках м. Івано-Франківська; розраховано орієнтовні викиди забруднювальних речовин; визначено найбільш екологічно напружені ділянки; обґрунтовано технологічні, організаційні та природоохоронні заходи щодо скорочення викидів автотранспорту.

Об'єктом дослідження є автотранспорт як джерело забруднення атмосферного повітря в межах міських територій. Предметом дослідження є технології, організаційні рішення та природоохоронні заходи, спрямовані на скорочення викидів автотранспорту в умовах міського середовища.

У процесі виконання бакалаврської роботи використано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема аналіз і узагальнення літературних джерел, порівняльний аналіз, системний підхід, розрахунковий метод оцінювання викидів, метод спостереження за транспортними потоками, табличне та графічне узагальнення результатів. Застосування цих методів дало змогу комплексно оцінити роль автотранспорту у формуванні забруднення атмосферного повітря та визначити пріоритетні напрями зниження транспортного навантаження.

У першому розділі роботи розглянуто теоретичні основи впливу автотранспорту на стан міського довкілля. Встановлено, що автомобільний транспорт є одним із ключових джерел забруднення атмосферного повітря, оскільки його викиди формуються безпосередньо в місцях проживання, праці,

навчання та відпочинку населення. Основними забруднювальними речовинами, які надходять в атмосферу від автотранспорту, є оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, леткі органічні сполуки, тверді частинки PM_{10} і $PM_{2.5}$, сажа, бензапірен і важкі метали. Ці речовини мають різне походження та різний характер впливу, однак у сукупності вони погіршують якість повітря, створюють ризики для здоров'я населення і негативно впливають на стан міських екосистем.

Особливу увагу в роботі приділено впливу транспортних викидів на здоров'я населення. Показано, що дрібнодисперсні тверді частинки, оксиди азоту, оксид вуглецю, сажа, бензапірен і важкі метали можуть негативно впливати на органи дихання, серцево-судинну систему, загальне самопочуття та якість життя людей. Найбільш уразливими до дії забрудненого повітря є діти, люди похилого віку, вагітні жінки та особи з хронічними захворюваннями. Крім того, транспортне забруднення погіршує стан зелених насаджень, сприяє накопиченню забруднювачів у ґрунтах, знижує біологічну активність ґрунтового середовища та посилює несприятливі зміни міського мікроклімату.

У роботі проаналізовано нормативно-правові засади регулювання викидів автотранспорту. Визначено, що система регулювання має ґрунтуватися на природоохоронному законодавстві, санітарних нормативах якості атмосферного повітря, державному моніторингу, вимогах до технічного стану транспортних засобів і поступовій гармонізації з європейськими екологічними стандартами. Важливим є врахування не лише вихлопних, а й невихлопних джерел забруднення, оскільки навіть за умов розвитку електротранспорту залишаються актуальними проблеми зношування шин, гальмівних систем, дорожнього покриття та утворення пилу.

У другому розділі охарактеризовано міську транспортну систему як чинник екологічного навантаження. Встановлено, що рівень забруднення атмосферного повітря залежить від інтенсивності транспортного потоку, структури автопарку, віку та технічного стану транспортних засобів, типу

пального, режиму руху, наявності заторів, організації паркування, розвитку громадського транспорту та планувальної структури міста. Найбільш небезпечними є ділянки з інтенсивним рухом, частими зупинками й розгонами, значною часткою приватних автомобілів, автобусів і вантажного транспорту, а також території зі щільною забудовою та недостатнім озелененням.

У практичній частині бакалаврської роботи здійснено оцінку транспортного навантаження та розрахунків викидів забруднювальних речовин на трьох характерних ділянках м. Івано-Франківська: П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька, П2 - вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу, П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста. За результатами розрахунків встановлено, що найбільш екологічно напруженою є ділянка П1, для якої характерна найвища інтенсивність руху - близько 1001 транспортного засобу за годину. На цій ділянці розрахункові викиди становлять: CO₂ - 122,49 кг/год, CO - 812,75 г/год, NO_x - 338,92 г/год. Це свідчить про значне транспортне навантаження центральної частини міста та необхідність першочергового впровадження заходів щодо зменшення забруднення атмосферного повітря.

Для ділянки П2 - вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу - розрахункові викиди CO₂ становлять 104,02 кг/год, CO - 692,95 г/год, NO_x - 285,82 г/год. Ця ділянка має важливе транспортне значення через близькість до залізничного вокзалу, активний рух громадського транспорту та значну кількість пішоходів. Для ділянки П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста - розрахункові викиди CO₂ становлять 106,52 кг/год, CO - 663,90 г/год, NO_x - 328,00 г/год. Значення викидів на цій ділянці пов'язані з впливом транзитного та вантажного транспорту.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано основні напрями скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій. До технічних заходів належать модернізація транспортних засобів, використання каталізаторів і сажових фільтрів, регулярний технічний контроль автомобілів, застосування якісного пального, підвищення паливної ефективності,

оновлення громадського транспорту та розвиток електротранспорту. До організаційних заходів належать оптимізація схем дорожнього руху, упровадження адаптивного світлофорного регулювання, обмеження транзитного і вантажного руху в центральних районах, створення виділених смуг для громадського транспорту, упорядкування паркування та запровадження зон спокійного руху.

Окремим напрямом скорочення викидів є розвиток сталої міської мобільності. Зменшенню транспортного навантаження сприятиме підвищення якості громадського транспорту, збільшення частки електробусів і тролейбусів, розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури, створення безпечних і зручних маршрутів для пересування містом без використання приватного автомобіля. Важливе значення мають також природоохоронні заходи: озеленення транспортних коридорів, створення захисних зелених смуг, висадження стійких до забруднення видів дерев і кущів, догляд за зеленими насадженнями та збільшення площі міських зелених зон.

Практичне значення бакалаврської роботи полягає в тому, що запропоновані заходи можуть бути використані для зменшення негативного впливу автотранспорту на атмосферне повітря міських територій, покращення екологічного стану центральних і транспортно навантажених районів, підвищення комфортності проживання населення та формування сталої системи міської мобільності. Результати роботи можуть бути корисними для екологічного планування, організації дорожнього руху, розроблення місцевих природоохоронних програм і заходів з удосконалення транспортної інфраструктури.

У роботі доведено, що скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій можливе лише за умови комплексного підходу, який поєднує технічне оновлення транспортних засобів, ефективне управління дорожнім рухом, розвиток громадського та електричного транспорту, обмеження надмірного використання приватних автомобілів, розширення зелених насаджень і системний моніторинг якості атмосферного повітря.

Реалізація запропонованих заходів сприятиме зниженню рівня транспортного забруднення, покращенню стану міського довкілля, зменшенню ризиків для здоров'я населення та підвищенню екологічної безпеки міста.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: автотранспорт, транспортні викиди, міські території, атмосферне повітря, забруднювальні речовини, оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, тверді частинки, екологічна безпека, громадський транспорт, електротранспорт, зелена інфраструктура, стала мобільність, Івано-Франківськ.

ABSTRACT

The bachelor's thesis on the topic "Technologies for reducing vehicle emissions within urban areas" is devoted to the study of the impact of road transport on the state of atmospheric air in urbanized areas and the justification of a set of measures aimed at reducing traffic pollution. The work was carried out under the educational and professional program "Environmental protection technologies" specialty 183 "Environmental protection technologies".

The topicality of the topic is due to the fact that motor vehicles are one of the most widespread and dynamic sources of atmospheric air pollution within urban areas. The increase in the number of private cars, the intensity of traffic, the frequency of traffic jams, the expansion of road infrastructure and the increase of parking spaces lead to an increase in the environmental load on atmospheric air, soils, green spaces and the health of the population. The peculiarity of transport pollution is that the sources of emissions are located directly in the area of people's vital activities - near residential buildings, educational institutions, hospitals, public spaces, parks, public transport stops and places of mass population.

Road transport creates a complex impact on the urban environment. Its negative effect is manifested not only through exhaust gases, but also through non-exhaust sources of pollution: wear and tear of tires, brake pads, road surface, repeated rise of road dust, leaks of fuel and lubricants, noise and vibration load. In this regard, the reduction of motor vehicle emissions is an important condition for increasing the environmental safety of cities, improving the quality of atmospheric air, and creating a comfortable urban environment.

The aim of the bachelor's work is to study the impact of motor vehicles on the state of atmospheric air within urban areas and to justify technologies and measures aimed at reducing transport emissions and improving the environmental safety of the urban environment.

In order to achieve the set goal, the following tasks were solved in the work: the theoretical bases of the influence of motor vehicles on the state of the urban

environment were considered; the main pollutants in vehicle emissions are characterized; the impact of transport emissions on public health and urban ecosystems was analyzed; the normative and legal regulation of motor vehicle emissions was investigated; characterized the urban transport system as a factor of environmental load; an assessment of the traffic load in certain sections of the city of Ivano-Frankivsk was carried out; estimated emissions of pollutants are calculated; the most ecologically stressed areas are determined; technological, organizational and environmental protection measures to reduce motor vehicle emissions are substantiated.

The object of the study is motor vehicles as a source of atmospheric air pollution within urban areas. The subject of the research is technologies, organizational solutions and environmental protection measures aimed at reducing vehicle emissions in the urban environment.

In the process of completing the bachelor's work, general scientific and special research methods were used, in particular, analysis and generalization of literary sources, comparative analysis, systematic approach, calculation method for estimating emissions, method of monitoring traffic flows, tabular and graphical summarization of results. The application of these methods made it possible to comprehensively evaluate the role of motor vehicles in the formation of atmospheric air pollution and to determine the priority directions for reducing the traffic load.

The first chapter of the work examines the theoretical foundations of the influence of motor vehicles on the state of the urban environment. It has been established that road transport is one of the key sources of atmospheric air pollution, as its emissions are formed directly in the places of residence, work, study and recreation of the population. The main pollutants entering the atmosphere from motor vehicles are carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, volatile organic compounds, solid particles PM_{10} and $PM_{2.5}$, soot, benzopyrene and heavy metals. These substances have different origins and different nature of impact, but collectively they worsen air quality, create risks for public health and negatively affect the state of urban ecosystems.

Special attention is paid to the impact of transport emissions on the health of the population. It has been shown that fine solid particles, nitrogen oxides, carbon monoxide, soot, benzapyrene and heavy metals can negatively affect the respiratory system, cardiovascular system, general well-being and quality of life of people. The most vulnerable to the effects of polluted air are children, the elderly, pregnant women and people with chronic diseases. In addition, traffic pollution worsens the condition of green spaces, contributes to the accumulation of pollutants in the soil, reduces the biological activity of the soil environment, and increases adverse changes in the urban microclimate.

The paper analyzes the normative and legal principles of regulation of motor vehicle emissions. It was determined that the regulatory system should be based on environmental legislation, sanitary standards of atmospheric air quality, state monitoring, requirements for the technical condition of vehicles and gradual harmonization with European environmental standards. It is important to take into account not only exhaust, but also non-exhaust sources of pollution, since even under the conditions of the development of electric transport, the problems of tire wear, brake systems, road surface and dust formation remain relevant.

The second chapter describes the urban transport system as a factor of ecological load. It has been established that the level of atmospheric air pollution depends on the intensity of traffic flow, the structure of the car fleet, the age and technical condition of vehicles, the type of fuel, the mode of traffic, the presence of traffic jams, the organization of parking, the development of public transport and the planning structure of the city. The most dangerous areas are areas with heavy traffic, frequent stops and accelerations, a significant share of private cars, buses and trucks, as well as areas with dense buildings and insufficient greenery.

In the practical part of the bachelor's thesis, an assessment of the transport load and the calculation of emissions of pollutants in three characteristic areas of the city of Ivano-Frankivsk were carried out: P1 - st. Nezalezhnosti - st. Halytska, P2 - str. Vovchynetska - district of the railway station, P3 - st. Halytska - entry/exit from the city. Based on the results of the calculations, it was established that the most

ecologically stressful section is P1, which is characterized by the highest traffic intensity - about 1,001 vehicles per hour. In this area, the estimated emissions are: CO₂ - 122.49 kg/h, CO - 812.75 g/h, NO_x - 338.92 g/h. This indicates a significant traffic load in the central part of the city and the need for priority implementation of measures to reduce atmospheric air pollution.

For plot P2 - st. Vovchinetsk - railway station area - estimated emissions of CO₂ are 104.02 kg/h, CO - 692.95 g/h, NO_x - 285.82 g/h. This area has important transport importance due to its proximity to the railway station, active public transport traffic and a significant number of pedestrians. For plot P3 - st. Halytska - entry/exit from the city - estimated emissions of CO₂ are 106.52 kg/h, CO - 663.90 g/h, NO_x - 328.00 g/h. Emission values in this area are related to the impact of transit and freight transport.

On the basis of the conducted analysis, the main areas of reduction of motor vehicle emissions within urban areas are substantiated. Technical measures include modernization of vehicles, use of catalysts and particulate filters, regular technical control of cars, use of high-quality fuel, improvement of fuel efficiency, renewal of public transport and development of electric transport. The organizational measures include the optimization of traffic patterns, the introduction of adaptive traffic light regulation, the restriction of transit and freight traffic in central areas, the creation of dedicated lanes for public transport, the regulation of parking and the introduction of quiet traffic zones.

A separate area of emissions reduction is the development of sustainable urban mobility. Improving the quality of public transport, increasing the share of electric buses and trolleybuses, developing bicycle and pedestrian infrastructure, and creating safe and convenient routes for moving around the city without using a private car will contribute to reducing the traffic load. Environmental protection measures are also important: greening of transport corridors, creation of protective green belts, planting of pollution-resistant species of trees and bushes, care for green areas and increasing the area of urban green zones.

The practical significance of the bachelor's work is that the proposed measures can be used to reduce the negative impact of motor vehicles on the atmospheric air of urban areas, improve the ecological condition of central and traffic-heavy areas, increase the comfort of living of the population and form a sustainable system of urban mobility. The results of the work can be useful for environmental planning, traffic management, development of local environmental protection programs and measures to improve transport infrastructure.

The work proves that reducing vehicle emissions within urban areas is possible only with an integrated approach that combines technical renewal of vehicles, effective traffic management, development of public and electric transport, restriction of excessive use of private cars, expansion of green spaces and systematic monitoring of atmospheric air quality. The implementation of the proposed measures will contribute to reducing the level of traffic pollution, improving the state of the urban environment, reducing risks to public health and increasing the ecological safety of the city.

Key words: motor vehicles, transport emissions, urban areas, atmospheric air, pollutants, carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, solid particles, environmental safety, public transport, electric transport, green infrastructure, sustainable mobility, Ivano-Frankivsk.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ АВТОТРАНСПОРТУ НА СТАН МІСЬКОГО ДОВКІЛЛЯ.....	19
1.1. Автотранспорт як джерело забруднення атмосферного повітря в містах.....	19
1.2. Основні забруднювальні речовини у викидах автотранспорту.....	22
1.3. Вплив транспортних викидів на здоров'я населення та міські екосистеми.....	28
1.4. Нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту.....	34
Висновки до розділу 1.....	38
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ АВТОТРАНСПОРТОМ У МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЯХ.....	41
2.1. Характеристика міської транспортної системи як чинника екологічного навантаження.....	41
2.2. Методика оцінювання викидів автотранспорту.....	46
2.3. Оцінка екологічних ризиків від викидів автотранспорту.....	54
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	62
Оцінювання викидів автотранспорту в м. Івано-Франківську.....	62
РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАХОДИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ В МІСТАХ.....	77
4.1. Технічні технології зменшення викидів від транспортних засобів.....	77
4.2. Організаційні заходи зменшення транспортного навантаження.....	83
4.3. Розвиток екологічного громадського транспорту.....	90
4.4. Розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури.....	97
4.5. Використання зелених насаджень для зниження впливу транспортного забруднення.....	103
4.6. Пропозиції щодо скорочення викидів автотранспорту для конкретної міської території.....	108

ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118

ВСТУП

У сучасних умовах урбанізації автотранспорт є одним із найважливіших чинників впливу на стан міського довкілля. Зростання кількості транспортних засобів, інтенсивності руху, частоти заторів, розширення дорожньої інфраструктури та збільшення площ паркування призводять до посилення екологічного навантаження на атмосферне повітря, ґрунтовий покрив, зелені насадження та здоров'я населення. Особливо актуальною ця проблема є для міських територій, де джерела викидів розташовані безпосередньо поблизу житлових будинків, навчальних закладів, лікарень, громадських просторів і зон відпочинку.

Автомобільний транспорт є мобільним джерелом забруднення, тому його вплив має складний просторовий характер. На відміну від стаціонарних промислових джерел, транспортні засоби постійно переміщуються в межах міста, формуючи забруднення вздовж вулично-дорожньої мережі, на перехрестях, у місцях скупчення автомобілів, біля зупинок громадського транспорту, паркувальних майданчиків і транспортних розв'язок. Найбільші концентрації забруднювальних речовин зазвичай спостерігаються в години пік, коли транспортні засоби працюють у режимах частого гальмування, розгону та холостого ходу.

До основних забруднювальних речовин, які надходять в атмосферне повітря від автотранспорту, належать оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, леткі органічні сполуки, тверді частинки, сажа, бензапірен і важкі метали. Вони утворюються як унаслідок згоряння пального в двигунах внутрішнього згоряння, так і внаслідок невихлопних процесів - зношування шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття та повторного піднімання пилу. Саме тому транспортне забруднення слід розглядати як комплексну екологічну проблему, що охоплює не лише якість атмосферного повітря, а й стан ґрунтів, рослинності, міського мікроклімату та комфортність проживання населення.

Актуальність теми бакалаврської роботи зумовлена необхідністю пошуку й упровадження ефективних технологій та заходів скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій. Для забезпечення екологічної безпеки міста важливо не лише оцінити рівень транспортного навантаження, а й обґрунтувати практичні напрями його зменшення. До таких напрямів належать модернізація транспортних засобів, розвиток громадського та електричного транспорту, оптимізація організації дорожнього руху, обмеження використання приватних автомобілів у перевантажених зонах, створення велосипедної та пішохідної інфраструктури, розширення зелених насаджень і впровадження системного моніторингу якості атмосферного повітря.

Метою бакалаврської роботи є дослідження впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря в межах міських територій та обґрунтування технологій і заходів, спрямованих на скорочення транспортних викидів і підвищення екологічної безпеки міського середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: розглянути теоретичні основи впливу автотранспорту на стан міського довкілля; охарактеризувати основні забруднювальні речовини, що містяться у викидах автотранспорту; проаналізувати вплив транспортних викидів на здоров'я населення та міські екосистеми; дослідити нормативно-правові засади регулювання викидів автотранспорту; охарактеризувати міську транспортну систему як чинник екологічного навантаження; оцінити рівень транспортного навантаження та розрахункові викиди забруднювальних речовин на досліджуваних ділянках міста; визначити найбільш екологічно напружені ділянки міської території; обґрунтувати технологічні, організаційні та природоохоронні заходи щодо скорочення викидів автотранспорту; розробити пропозиції щодо зменшення негативного впливу автотранспорту на атмосферне повітря міста.

Об'єктом дослідження є автотранспорт як джерело забруднення атмосферного повітря в межах міських територій.

Предметом дослідження є технології, організаційні рішення та природоохоронні заходи, спрямовані на скорочення викидів автотранспорту в умовах міського середовища.

У процесі виконання бакалаврської роботи використано загальнонаукові та спеціальні методи дослідження: аналіз і узагальнення літературних джерел, порівняльний аналіз, системний підхід, розрахунковий метод оцінювання викидів, метод спостереження за транспортними потоками, а також графічне й табличне узагальнення отриманих результатів. Застосування цих методів дало змогу оцінити екологічне навантаження від автотранспорту та визначити пріоритетні напрями його зменшення.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновані заходи можуть бути використані для покращення екологічного стану атмосферного повітря в межах міських територій, зменшення транспортного навантаження, підвищення комфортності проживання населення та формування сталої системи міської мобільності. Особливу увагу приділено поєднанню технічних, організаційних і природоохоронних рішень, оскільки саме комплексний підхід є найбільш ефективним для скорочення викидів автотранспорту.

Бакалаврська робота складається зі вступу, основних розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків. У першому розділі розглянуто теоретичні основи впливу автотранспорту на стан міського довкілля. У другому розділі проаналізовано стан забруднення атмосферного повітря автотранспортом у міських територіях. У практичній частині виконано оцінку транспортного навантаження та розрахункових викидів забруднювальних речовин на досліджуваних ділянках м. Івано-Франківська. У завершальній частині роботи обґрунтовано технології та заходи скорочення викидів автотранспорту, спрямовані на підвищення екологічної безпеки міського середовища.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВПЛИВУ АВТОТРАНСПОРТУ НА СТАН МІСЬКОГО ДОВКІЛЛЯ

1.1. Автотранспорт як джерело забруднення атмосферного повітря в містах

Автотранспорт є одним із найпоширеніших і найдинамічніших джерел забруднення атмосферного повітря в межах міських територій. На відміну від стаціонарних промислових джерел, транспортні засоби постійно переміщуються в просторі, тому їхній вплив має лінійно-площинний характер і охоплює значну частину міського середовища: магістральні вулиці, перехрестя, житлові квартали, зупинки громадського транспорту, паркувальні зони та території поблизу соціальних об'єктів. Особливо актуальною ця проблема є для великих і середніх міст, де спостерігається висока концентрація автомобілів, інтенсивний рух, часті затори та недостатній розвиток екологічно безпечних видів мобільності [1, 7].

Забруднення атмосферного повітря автотранспортом формується переважно внаслідок згоряння пального у двигунах внутрішнього згоряння. Під час роботи бензинових і дизельних двигунів в атмосферу надходять оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, діоксид сірки, тверді частинки, сажа, а також діоксид вуглецю як основний парниковий газ. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, транспорт є важливим чинником формування забруднення повітря, зокрема через викиди твердих частинок, які пов'язані з ризиками для здоров'я населення [1, 4].

У сучасних містах автотранспорт створює не лише хімічне, а й комплексне екологічне навантаження. Його вплив проявляється через забруднення атмосферного повітря, підвищення рівня шуму, вібраційне навантаження, забруднення ґрунтів і поверхневого стоку продуктами зношування шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття та залишками паливно-мастильних матеріалів. Тому транспортне забруднення доцільно

розглядати як багатофакторну проблему міського середовища [3, 7].

Основним джерелом викидів автотранспорту є відпрацьовані гази. Їхній склад залежить від типу двигуна, виду пального, технічного стану автомобіля, режиму руху, віку транспортного засобу, умов експлуатації та якості дорожньої інфраструктури. Наприклад, у режимі частих зупинок і розгонів, характерному для міського руху, споживання пального зростає, а разом із ним збільшується кількість викидів. Саме тому затори, перевантажені перехрестя та неефективна організація дорожнього руху посилюють негативний вплив автотранспорту на якість атмосферного повітря [3, 4].

До найважливіших забруднювальних речовин, що надходять в атмосферу від автотранспорту, належать оксид вуглецю, оксиди азоту, леткі органічні сполуки, тверді частинки PM_{10} і $PM_{2.5}$, сажа, бензапірен, важкі метали та діоксид вуглецю. Оксид вуглецю утворюється переважно за умов неповного згоряння пального. Оксиди азоту формуються за високих температур у камері згоряння двигуна. Леткі органічні сполуки можуть надходити як із вихлопними газами, так і внаслідок випаровування пального. Тверді частинки є особливо небезпечними через здатність проникати в дихальну систему людини [5, 7].

Важливо зазначити, що забруднення від автотранспорту не обмежується лише вихлопними газами. Значну роль відіграють так звані невихлопні викиди, які утворюються внаслідок стирання шин, гальмівних колодок і дорожнього покриття. Такі частинки можуть містити метали, органічні сполуки та мікрочастинки гуми. Проблема невихлопних викидів залишається актуальною навіть у разі поступового переходу на електромобілі, оскільки електричний транспорт не має вихлопних газів, але все одно спричиняє зношування шин і дорожнього покриття. У сучасних європейських дослідженнях невихлопні викиди розглядаються як один із важливих чинників формування міського пилового забруднення [8, 10].

Особливістю транспортного забруднення в містах є його безпосередня близькість до населення. Автомобільні дороги проходять поруч із житловими

будинками, навчальними закладами, лікарнями, ринками, парками та іншими громадськими просторами. Через це навіть відносно невеликі концентрації забруднювальних речовин можуть створювати відчутне навантаження на здоров'я людей, особливо дітей, людей похилого віку та осіб із хронічними захворюваннями органів дихання або серцево-судинної системи. За даними ВООЗ, забруднення атмосферного повітря пов'язане з підвищеними ризиками серцево-судинних, респіраторних та інших захворювань [11, 17].

У межах щільної міської забудови негативний вплив автотранспорту може посилюватися через недостатню вентиляцію вуличного простору. Вулиці з високими будинками, інтенсивним рухом і слабким озелененням часто формують так званий ефект «вуличного каньйону», коли забруднювальні речовини затримуються в приземному шарі повітря. У таких умовах концентрація шкідливих речовин біля дороги може бути значно вищою, ніж на відкритих територіях [13, 15].

Європейське агентство з довкілля зазначає, що транспорт залишається вагомим джерелом забруднення повітря. Зокрема, у країнах ЄС у 2023 році транспорт був найбільшим джерелом викидів оксидів азоту, а також суттєвим джерелом твердих частинок PM_{10} і $PM_{2.5}$. Це підтверджує, що навіть за умов розвитку екологічних стандартів і модернізації автопарку проблема транспортних викидів залишається актуальною для міських територій [14, 18].

З позиції екологічної безпеки автотранспорт слід розглядати як джерело як прямих, так і непрямих впливів. До прямих належать викиди забруднювальних речовин у повітря, утворення пилу, шуму та теплового навантаження. До непрямих впливів можна віднести зміну структури міського простору, збільшення площі доріг і паркувальних майданчиків, зменшення зелених зон, ущільнення ґрунтів, формування поверхневого стоку з вмістом нафтопродуктів і важких металів [15, 19].

В Україні питання охорони атмосферного повітря регулюється Законом України «Про охорону атмосферного повітря», який визначає правові та організаційні основи збереження, поліпшення та відновлення стану

атмосферного повітря. У контексті теми бакалаврської роботи цей закон є базовим нормативним документом, оскільки встановлює загальні вимоги щодо запобігання шкідливому впливу забруднювальних речовин на довкілля та здоров'я населення [15, 20].

Отже, автотранспорт є одним із ключових чинників погіршення якості атмосферного повітря в містах. Його небезпека полягає не лише у значних обсягах викидів, а й у тому, що забруднення формується безпосередньо в зоні проживання та перебування людей. У зв'язку з цим скорочення викидів автотранспорту має бути важливим напрямом міської екологічної політики. Для цього необхідне поєднання технічних, організаційних, планувальних і природоохоронних заходів: модернізація транспортних засобів, розвиток громадського транспорту, оптимізація дорожнього руху, створення велосипедної та пішохідної інфраструктури, обмеження руху в перевантажених зонах і розширення зелених насаджень уздовж транспортних магістралей [16, 21].

Автотранспорт є потужним джерелом забруднення атмосферного повітря в межах міських територій. Основними забруднювальними речовинами, що утворюються під час експлуатації транспортних засобів, є оксид вуглецю, оксиди азоту, леткі органічні сполуки, тверді частинки, сажа та діоксид вуглецю. Особливу небезпеку становить те, що транспортні викиди надходять у повітря безпосередньо в місцях проживання, навчання, праці та відпочинку населення. Тому дослідження технологій скорочення викидів автотранспорту є актуальним завданням для забезпечення екологічної безпеки міст і покращення якості життя населення [17, 22].

1.2. Основні забруднювальні речовини у викидах автотранспорту

Викиди автотранспорту є складною сумішшю газоподібних, рідких і твердих компонентів, які утворюються переважно під час згоряння пального у двигунах внутрішнього згоряння. Їхній склад залежить від виду пального, типу

двигуна, технічного стану транспортного засобу, режиму руху, якості дорожнього покриття, інтенсивності транспортного потоку та умов експлуатації автомобіля. У міських умовах особливо небезпечними є режими частих зупинок, розгонів, руху в заторах і роботи двигуна на холостому ходу, оскільки вони сприяють збільшенню питомих викидів забруднювальних речовин [18, 22].

До основних забруднювальних речовин, які надходять в атмосферне повітря внаслідок експлуатації автотранспорту, належать оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO₂), оксиди азоту (NO_x), вуглеводні та леткі органічні сполуки, тверді частинки PM₁₀ і PM_{2.5}, сажа, бензапірен і важкі метали. Європейське агентство з довкілля розглядає транспорт як джерело таких забруднювачів, як CO, NO_x, неметанові леткі органічні сполуки, SO_x, PM₁₀ і PM_{2.5}, що підтверджує комплексний характер впливу транспорту на якість атмосферного повітря [19, 23].

Оксид вуглецю (CO) є одним із найхарактерніших компонентів вихлопних газів автомобілів. Він утворюється внаслідок неповного згоряння вуглеводневого пального, особливо за недостатньої кількості кисню в паливно-повітряній суміші. Найбільші концентрації оксиду вуглецю спостерігаються під час роботи двигуна на холостому ходу, у заторах, під час прогрівання автомобіля та за несправності паливної системи. CO є безбарвним газом без запаху, що ускладнює його виявлення без спеціальних приладів. Його небезпека полягає у здатності зв'язуватися з гемоглобіном крові, що знижує перенесення кисню в організмі людини. У міських умовах основну увагу слід приділяти контролю CO в місцях інтенсивного руху транспорту, на закритих паркінгах, у тунелях та біля великих перехресть [20, 27].

Діоксид вуглецю (CO₂) не належить до класичних токсичних забруднювачів атмосферного повітря в малих концентраціях, однак є основним парниковим газом, що утворюється під час згоряння бензину, дизельного пального, скрапленого нафтового газу та інших видів пального. Його кількість прямо залежить від обсягів спожитого пального: чим більше

пального спалює транспортний засіб, тим більше CO_2 надходить в атмосферу. Тому скорочення викидів діоксиду вуглецю тісно пов'язане з підвищенням паливної ефективності автомобілів, розвитком електротранспорту, громадського транспорту, велосипедної інфраструктури та зменшенням залежності населення від приватних автомобілів. За даними ЕРА, типовий пасажирський автомобіль може викидати близько 4,6 метричної тонни CO_2 на рік, хоча цей показник залежить від типу пального, паливної економічності та пробігу [21, 24].

Оксиди азоту (NO_x) - це група сполук, до якої належать передусім оксид азоту (NO) і діоксид азоту (NO_2). Вони утворюються в камері згоряння двигуна за високих температур унаслідок реакції азоту й кисню повітря. Найбільш інтенсивно NO_x утворюються у двигунах, що працюють за високих температур і навантажень, зокрема в дизельних двигунах. У міському повітрі оксиди азоту беруть участь у фотохімічних реакціях, сприяють утворенню приземного озону та вторинних аерозолів. Діоксид азоту є небезпечним для органів дихання, особливо для дітей, людей похилого віку та осіб із хронічними респіраторними захворюваннями. Саме тому NO_2 часто використовують як один із показників забруднення повітря в зонах інтенсивного дорожнього руху [6, 11].

Вуглеводні та леткі органічні сполуки утворюються внаслідок неповного згоряння пального, випаровування бензину з паливної системи, роботи двигуна в нестабільних режимах, а також через несправність систем очищення відпрацьованих газів. До цієї групи належить велика кількість органічних речовин, частина з яких має токсичні, подразнювальні або канцерогенні властивості. Леткі органічні сполуки разом з оксидами азоту беруть участь у фотохімічних реакціях, унаслідок яких формується фотохімічний смог. Для міст із високою щільністю забудови та значним транспортним навантаженням це є особливо актуальною проблемою, оскільки смог погіршує видимість, подразнює слизові оболонки та негативно впливає на стан рослинності [12, 14].

Тверді частинки PM_{10} і $PM_{2.5}$ є одними з найнебезпечніших компонентів транспортного забруднення. PM_{10} - це частинки з аеродинамічним діаметром до 10 мкм, а $PM_{2.5}$ - дрібнодисперсні частинки з діаметром до 2,5 мкм. Небезпека цих частинок полягає в тому, що вони можуть проникати в дихальні шляхи, а найдрібніші - досягати глибоких відділів легень. Всесвітня організація охорони здоров'я визначає дрібнодисперсні тверді частинки як один із ключових чинників ризику для здоров'я, пов'язаний із серцево-судинними, респіраторними захворюваннями та раком легень [2, 7].

Джерелами твердих частинок є не лише вихлопні гази дизельних і бензинових двигунів, але й невихлопні процеси: зношування шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття та повторне піднімання дорожнього пилу в повітря. Це має особливе значення в умовах переходу до електромобілів, оскільки електричні транспортні засоби не мають вихлопних газів, але все одно утворюють частинки внаслідок контакту шин із дорогою та роботи гальмівної системи. Європейське агентство з довкілля зазначає, що невихлопні викиди від дорожнього транспорту, пов'язані зі зношуванням шин, гальм і дорожнього покриття, у 1990–2023 роках зросли на 63,1%, що підкреслює актуальність цієї проблеми для сучасних міст [3, 8].

Сажа є різновидом вуглецевих твердих частинок, що утворюються переважно під час неповного згоряння дизельного пального. Вона має високу сорбційну здатність, тобто може накопичувати на своїй поверхні інші токсичні речовини, зокрема поліциклічні ароматичні вуглеводні. Частинки сажі затемнюють поверхні будівель, осідають на листках рослин, погіршують естетичний стан міського середовища та можуть негативно впливати на здоров'я населення. Найбільші обсяги сажі характерні для старих дизельних автомобілів, автобусів, вантажівок і спецтехніки без ефективних систем очищення відпрацьованих газів [12, 20].

Бензапірен, або бензо[а]пірен, належить до поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Він утворюється під час неповного згоряння органічного пального і може бути присутнім у вихлопних газах, особливо за

неефективного згоряння пального або експлуатації старих транспортних засобів. Бензапірен є особливо небезпечним забруднювачем через канцерогенні властивості. За даними токсикологічних оглядів, Міжнародне агентство з вивчення раку класифікує бензо[а]пірен як канцерогенний для людини, тобто речовину групи 1 [23, 25].

Важкі метали у транспортному забрудненні можуть надходити в атмосферу з різних джерел: унаслідок зношування шин, гальмівних колодок, деталей двигуна, дорожнього покриття, а також із дорожнього пилю. До таких елементів належать свинець, кадмій, мідь, цинк, нікель, хром та інші метали. Хоча використання етильованого бензину в багатьох країнах було обмежене або заборонене, проблема важких металів у придорожньому середовищі залишається актуальною через невихлопні джерела. Важкі метали можуть накопичуватися в ґрунтах уздовж доріг, потрапляти в поверхневий стік, осідати на рослинності та створювати ризики для міських екосистем [24, 28].

Склад і кількість забруднювальних речовин у викидах автотранспорту значною мірою залежать від типу транспортного засобу. Легкові автомобілі переважно формують значну частку викидів CO₂, CO та летких органічних сполук через свою чисельність у міському автопарку. Дизельні автобуси, вантажівки та спецтехніка часто є важливими джерелами NO_x, сажі та твердих частинок. Мотоцикли й мопеди, особливо зі старими двигунами, можуть бути джерелами вуглеводнів і оксиду вуглецю. Крім того, старіння автопарку, несвоєчасне технічне обслуговування та використання неякісного пального істотно збільшують рівень транспортного забруднення [29, 31].

Для зручності основні забруднювальні речовини автотранспорту можна узагальнити в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Забруднювальні речовини автотранспорту

Забруднювальна речовина	Основне джерело утворення	Екологічна та санітарна небезпека
Оксид вуглецю, CO	Неповне згоряння пального	Порушує перенесення кисню в організмі

Діоксид вуглецю, CO ₂	Повне згоряння пального	Основний парниковий газ від транспорту
Оксиди азоту, NO _x	Високотемпературне згоряння в двигуні	Сприяють утворенню смогу, подразнюють дихальні шляхи
Вуглеводні та ЛОС	Неповне згоряння, випаровування пального	Утворення фотохімічного смогу, токсична дія окремих сполук
PM ₁₀ і PM _{2.5}	Вихлопні гази, зношування шин, гальм, дорожнього покриття	Проникають у дихальну систему, підвищують ризики для здоров'я
Сажа	Неповне згоряння дизельного пального	Накопичує токсичні сполуки, забруднює повітря та поверхні
Бензапірен	Неповне згоряння органічного пального	Канцерогенна дія
Важкі метали	Зношування гальм, шин, деталей, дорожній пил	Накопичення в ґрунтах, токсична дія на екосистеми

Отже, викиди автотранспорту є багатокомпонентною сумішшю речовин, які мають різні механізми утворення та різний характер впливу на довкілля і здоров'я населення. Найбільшу небезпеку в межах міських територій становлять оксиди азоту, тверді частинки, сажа, леткі органічні сполуки, бензапірен і важкі метали, оскільки вони безпосередньо впливають на якість атмосферного повітря в зонах перебування людей. Водночас діоксид вуглецю є важливим показником кліматичного впливу транспорту, адже його викиди пов'язані зі споживанням викопного пального [31, 37].

Основними забруднювальними речовинами у викидах автотранспорту є оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, тверді частинки, сажа, бензапірен і важкі метали. Їхнє надходження в атмосферу пов'язане як

із процесами згоряння пального, так і з невихлопними джерелами - зношуванням шин, гальмівних колодок і дорожнього покриття. У міських умовах ці забруднювачі становлять особливу небезпеку через високу щільність населення, інтенсивний транспортний рух і близькість джерел викидів до житлової забудови, навчальних закладів, лікарень та громадських просторів [32, 35].

1.3. Вплив транспортних викидів на здоров'я населення та міські екосистеми

Транспортні викиди є одним із важливих чинників формування екологічної небезпеки в межах міських територій. Їхній негативний вплив проявляється не лише у погіршенні якості атмосферного повітря, а й у прямому та опосередкованому впливі на здоров'я населення, стан рослинності, ґрунтів, водних об'єктів і міський мікроклімат. Особливістю автотранспортного забруднення є те, що джерела викидів розташовані безпосередньо в зоні життєдіяльності людини: біля житлових будинків, шкіл, лікарень, дитячих майданчиків, зупинок громадського транспорту, парків і місць масового перебування населення [26, 29].

На відміну від багатьох промислових джерел, які можуть бути винесені за межі міста або мати санітарно-захисні зони, автомобільні дороги проходять через центральні й житлові райони. Тому населення міст щоденно зазнає впливу вихлопних газів, пилу від зношування шин і дорожнього покриття, шуму та вібрації. Найбільш небезпечними є ділянки з інтенсивним рухом транспорту, перехрестя, місця утворення заторів, тунелі, паркувальні майданчики та вузькі вулиці з недостатнім провітрюванням [29, 31].

Одним із основних напрямів негативного впливу транспортних викидів є їхня дія на органи дихання людини. Забруднювальні речовини, які надходять у повітря від автотранспорту, потрапляють в організм переважно інгаляційним шляхом, тобто під час дихання. Особливу небезпеку становлять

дрібнодисперсні тверді частинки $PM_{2.5}$ і PM_{10} , оксиди азоту, сажа, леткі органічні сполуки та бензапірен. Дрібні частинки здатні проникати глибоко в дихальні шляхи, осідати в бронхах і легенях, спричиняти подразнення слизових оболонок, запальні процеси та зниження функціональної здатності легень [36, 38].

Тривале перебування в умовах забрудненого транспортом повітря може сприяти розвитку або загостренню бронхітів, бронхіальної астми, алергічних реакцій, хронічного обструктивного захворювання легень та інших респіраторних патологій. Особливо вразливими є діти, оскільки їхня дихальна система ще формується, а частота дихання є вищою, ніж у дорослих. Також підвищений ризик мають люди похилого віку, вагітні жінки та особи з уже наявними захворюваннями органів дихання [38, 40].

Важливим показником транспортного забруднення є діоксид азоту, який утворюється під час високотемпературного згоряння пального у двигунах. У міських умовах підвищені концентрації NO_2 часто фіксуються поблизу автомобільних доріг. Ця речовина подразнює дихальні шляхи, знижує опірність організму до інфекцій, може посилювати прояви астми та інших захворювань бронхолегеневої системи. Крім того, оксиди азоту беруть участь у фотохімічних реакціях, які сприяють утворенню приземного озону та фотохімічного смогу [35, 37].

Значний вплив транспортні викиди мають і на серцево-судинну систему. Дрібнодисперсні частинки, продукти неповного згоряння пального, оксиди азоту та інші токсичні компоненти можуть спричиняти запальні реакції в організмі, порушувати роботу судин і підвищувати навантаження на серце. У людей, які тривалий час проживають або працюють біля доріг з інтенсивним рухом, може зростати ризик підвищення артеріального тиску, порушень серцевого ритму, ішемічної хвороби серця та інших серцево-судинних розладів [3, 9].

Оксид вуглецю, який утворюється внаслідок неповного згоряння пального, також має важливе санітарне значення. Він здатний зв'язуватися з

гемоглобіном крові, утворюючи карбоксигемоглобін, що знижує здатність крові переносити кисень. У результаті тканини організму можуть отримувати менше кисню, що особливо небезпечно для людей із серцево-судинними захворюваннями. Найвищий ризик впливу оксиду вуглецю спостерігається в місцях скупчення транспорту, на закритих паркінгах, у тунелях і під час тривалого перебування біля автомобілів із працюючими двигунами [4, 12].

Окрему небезпеку становлять канцерогенні речовини, зокрема бензапірен і деякі поліциклічні ароматичні вуглеводні. Вони утворюються під час неповного згоряння органічного пального, особливо за несправності двигуна або використання застарілого транспорту. Такі речовини можуть накопичуватися на поверхні частинок сажі та пилу, переноситися повітрям і потрапляти в організм людини під час дихання. Тривалий вплив канцерогенних компонентів транспортних викидів підвищує екологічні та санітарні ризики для населення [12, 19].

Транспортне забруднення також впливає на якість життя населення. Погіршення якості повітря супроводжується неприємними запахами, підвищеною запиленістю, зниженням комфортності перебування на вулицях, подразненням очей і слизових оболонок, швидкою втомлюваністю та погіршенням самопочуття. У районах із високою транспортною інтенсивністю люди частіше уникають прогулянок, провітрювання приміщень, занять спортом на відкритому повітрі. Це негативно впливає на фізичну активність населення та загальний рівень міського комфорту [13, 17].

Крім хімічного забруднення, автотранспорт створює шумове навантаження, яке також впливає на здоров'я та якість життя. Постійний шум від двигунів, гальмування, сигналів і руху транспорту може спричиняти дратівливість, порушення сну, зниження концентрації уваги, підвищення рівня стресу. Тому вплив автотранспорту на населення слід розглядати комплексно - як поєднання хімічного, акустичного, вібраційного та психологічного навантаження [15, 22].

Не менш важливим є вплив транспортних викидів на міські екосистеми.

Рослинність у містах виконує важливі екологічні функції: очищує повітря, затримує пил, знижує температуру повітря, формує комфортний мікроклімат, зменшує шумове навантаження та покращує естетичний стан міського середовища. Однак придорожні зелені насадження самі зазнають значного впливу транспортного забруднення [24, 31].

На листовій поверхні дерев і кущів осідає пил, сажа, важкі метали та інші забруднювальні речовини. Це може порушувати процеси фотосинтезу, дихання й транспірації рослин. Унаслідок постійного забруднення листя втрачає здатність ефективно виконувати газообмін, знижується приріст рослин, погіршується їхній декоративний стан, підвищується вразливість до хвороб, шкідників, посухи та температурних стресів. У придорожніх умовах часто спостерігається передчасне пожовтіння листя, зменшення густоти крони, всихання окремих гілок і скорочення тривалості життя дерев [25, 29].

Особливо чутливими до транспортного забруднення є рослини, що ростуть безпосередньо вздовж магістралей. Вони одночасно зазнають дії вихлопних газів, пилу, ущільнення ґрунту, нестачі вологи, механічних пошкоджень і засолення в зимовий період через використання протиожеледних реагентів. Тому зелені насадження вздовж доріг потребують правильного добору видового складу, регулярного догляду та моніторингу їхнього стану [29, 35].

Транспортні викиди негативно впливають і на ґрунти міських територій. Уздовж автомобільних доріг у ґрунтовому покриві можуть накопичуватися важкі метали, залишки нафтопродуктів, мікрочастинки гуми, продукти зношування гальмівних колодок і дорожнього покриття. Найбільше забруднення зазвичай спостерігається в придорожній смузі, де відбувається осідання пилу та аерозолів. Такі речовини можуть змінювати фізико-хімічні властивості ґрунтів, знижувати їхню біологічну активність, впливати на ґрунтову мікрофлору та погіршувати умови росту рослин [33, 37].

Важкі метали, які надходять у ґрунт унаслідок транспортної діяльності, є особливо небезпечними через здатність до накопичення. На відміну від

багатьох органічних речовин, вони не розкладаються повністю, а можуть тривалий час зберігатися в ґрунтовому середовищі. Через пил, поверхневий стік або поглинання рослинами ці елементи можуть включатися в міські біогеохімічні цикли. Тому ґрунти біля доріг, паркувальних майданчиків і транспортних розв'язок потребують екологічного контролю [31, 37].

Автотранспорт також впливає на міський мікроклімат. Велика кількість автомобілів, асфальтованих доріг, паркувальних зон і транспортної інфраструктури сприяє накопиченню тепла в місті. Двигуни транспортних засобів виділяють тепло, а дорожнє покриття інтенсивно нагрівається в теплий період року. Це посилює ефект міського теплового острова, коли температура повітря в центральних і густозабудованих районах є вищою, ніж на околицях або в зелених зонах [33, 35].

Погіршення мікроклімату пов'язане також із недостатньою кількістю зелених насаджень і переважанням штучних поверхонь. У районах із високою транспортною інтенсивністю та малою кількістю дерев повітря швидше нагрівається, зростає запиленість, знижується вологість, погіршується провітрювання. У таких умовах забруднювальні речовини можуть довше затримуватися в приземному шарі атмосфери, що посилює їхній вплив на населення [34, 36].

Особливо несприятливі умови формуються на вулицях із щільною багатоповерховою забудовою, де виникає ефект так званого «вуличного каньйону». У таких просторах повітрообмін обмежений, а вихлопні гази та пил накопичуються між будівлями. Це призводить до підвищення концентрацій забруднювальних речовин на рівні дихання людини, особливо в години пік [14, 24].

Для узагальнення впливу транспортних викидів на населення та міські екосистеми подані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Вплив транспортних викидів на населення та міські екосистеми

Об'єкт впливу	Основні чинники	Можливі наслідки
---------------	-----------------	------------------

	транспортного забруднення	
Органи дихання людини	PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , сажа, леткі органічні сполуки	Подразнення дихальних шляхів, загострення астми, бронхіти, зниження функції легень
Серцево-судинна система	Дрібнодисперсний пил, CO, NO _x , продукти неповного згоряння	Підвищення навантаження на серце, ризик порушення кровообігу, зростання серцево-судинних ризиків
Якість життя населення	Забруднене повітря, шум, пил, запахи, затори	Дискомфорт, стрес, порушення сну, зниження привабливості міського простору
Рослинність	Осідання пилу, сажі, важких металів, дія NO _x і озону	Пригнічення фотосинтезу, пошкодження листя, зниження стійкості рослин
Ґрунти	Важкі метали, нафтопродукти, мікрочастинки шин і гальм	Накопичення токсичних речовин, зниження біологічної активності ґрунту
Міський мікроклімат	Тепловиділення транспорту, асфальтовані поверхні, нестача зелених зон	Посилення ефекту теплового острова, погіршення провітрювання, накопичення забруднювачів

Отже, транспортні викиди мають комплексний вплив на міське середовище. Вони погіршують якість атмосферного повітря, створюють ризики для здоров'я населення, знижують комфортність проживання в місті та негативно впливають на стан природних компонентів урбанізованої території. Найбільш небезпечним є тривалий вплив забруднення в районах з інтенсивним транспортним рухом, щільною забудовою та недостатнім озелененням [15,

25].

Транспортні викиди є важливим чинником ризику для здоров'я населення та стану міських екосистем. Вони негативно впливають на органи дихання, серцево-судинну систему, загальне самопочуття та якість життя людей. Особливо небезпечними є дрібнодисперсні тверді частинки, оксиди азоту, оксид вуглецю, сажа, бензапірен і важкі метали. Крім впливу на людину, автотранспортне забруднення погіршує стан рослинності, сприяє накопиченню токсичних речовин у ґрунтах і посилює несприятливі зміни міського мікроклімату. Тому зменшення транспортних викидів є необхідною умовою підвищення екологічної безпеки міських територій і покращення якості життя населення [26, 33].

1.4. Нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту

Нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту є важливим елементом державної екологічної політики, оскільки саме через систему законів, стандартів, гранично допустимих концентрацій, вимог до транспортних засобів і моніторингу якості повітря забезпечується контроль за впливом транспорту на довкілля та здоров'я населення. У межах міських територій це питання має особливе значення, адже транспортні засоби є мобільними джерелами забруднення, які діють безпосередньо в зоні проживання, навчання, праці та відпочинку людей [24, 31].

В Україні базовим нормативно-правовим актом у сфері охорони атмосферного повітря є Закон України «Про охорону атмосферного **повітря**». Він визначає правові та організаційні основи охорони атмосферного повітря, а також спрямований на збереження і відновлення його природного стану, забезпечення екологічної безпеки та запобігання шкідливому впливу забрудненого повітря на здоров'я людей і навколишнє природне середовище.

У контексті теми бакалаврської роботи особливо важливе значення має положення цього Закону щодо зменшення забруднення атмосферного повітря викидами транспортних та інших пересувних засобів. Закон передбачає

впровадження комплексу заходів, спрямованих на зниження викидів, знешкодження шкідливих речовин, переведення транспорту на менш токсичні види палива, раціональне планування населених пунктів, обмеження в'їзду транспорту в окремі зони, поліпшення стану дорожнього покриття та впровадження автоматизованих систем регулювання дорожнього руху. Також визначено, що проєктування, виробництво й експлуатація транспортних засобів, у відпрацьованих газах яких вміст забруднювальних речовин перевищує нормативи, забороняються [31, 35].

Отже, українське природоохоронне законодавство розглядає автотранспорт не лише як технічний засіб пересування, а як потенційне джерело екологічної небезпеки. Це означає, що експлуатація транспортних засобів має здійснюватися з урахуванням екологічних вимог, технічного стану автомобіля, якості пального, організації дорожнього руху та впливу транспорту на населення [32, 24].

Важливим напрямом регулювання є встановлення норм якості атмосферного повітря. В Україні діють державні медико-санітарні нормативи допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць, затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 10 травня 2024 року № 813. Цей документ є чинним і замінив попередні гігієнічні регламенти 2020 року, які втратили чинність у червні 2024 року [33, 36].

Такі нормативи мають важливе практичне значення для оцінювання забруднення повітря в містах. Вони дають можливість порівнювати фактичні концентрації забруднювальних речовин із допустимими рівнями та визначати, чи становить стан атмосферного повітря ризик для здоров'я населення. Для теми транспортних викидів особливо важливими є нормативи щодо оксиду вуглецю, діоксиду азоту, оксиду азоту, твердих частинок, бензапірену, сірчистого ангідриду, формальдегіду та інших речовин, які можуть бути пов'язані з роботою автотранспорту [35, 38].

Окреме місце в системі регулювання займає державний моніторинг

атмосферного повітря. Постановою Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 року № 827 затверджено Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. Цей документ визначає організаційні засади спостереження за якістю повітря, зокрема перелік забруднювальних речовин, щодо яких проводиться оцінювання, граничні величини та цілі якості даних [16, 18].

Для міських територій моніторинг є особливо важливим, оскільки саме він дає змогу виявляти ділянки з підвищеним рівнем забруднення, оцінювати вплив транспортних магістралей, аналізувати ефективність природоохоронних заходів і приймати управлінські рішення. Наприклад, результати моніторингу можуть бути використані для обґрунтування створення зон обмеженого руху, зміни схем організації дорожнього руху, розвитку громадського транспорту, озеленення вулиць або впровадження автоматизованого регулювання транспортних потоків [5, 22].

У 2025 році в Україні також було затверджено порядок інформування населення про якість повітря з використанням індексу якості повітря. Він визначає механізм оперативного інформування громадян про стан атмосферного повітря та його можливий вплив на здоров'я, зокрема для чутливих і вразливих груп населення. Це є важливим кроком у напрямі підвищення екологічної обізнаності населення та формування відкритої системи доступу до даних про стан довкілля [4, 12].

Нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту також пов'язане з вимогами до самих транспортних засобів. В Україні діє Закон України «Про деякі питання ввезення на митну територію України та проведення першої державної реєстрації транспортних засобів», який регулює окремі питання допуску транспортних засобів до першої державної реєстрації. Документ є чинним і використовується як один із інструментів встановлення екологічних вимог до транспортних засобів, що ввозяться або вперше реєструються в Україні [4, 22].

Важливим орієнтиром для України є європейські екологічні стандарти,

зокрема стандарти типу Euro, які встановлюють допустимі рівні викидів для різних категорій транспортних засобів. Ці стандарти обмежують викиди оксиду вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів, твердих частинок та інших забруднювачів. Їхнє запровадження спрямоване на поступове зниження токсичності вихлопних газів, модернізацію двигунів, удосконалення систем очищення відпрацьованих газів і підвищення екологічної безпеки автотранспорту [4, 31].

У Європейському Союзі сучасний підхід до регулювання транспортних викидів розвивається в напрямі не лише контролю вихлопних газів, а й урахування реальних умов руху, довговічності систем очищення, викидів від гальм і шин, а також екологічних характеристик електромобілів. Зокрема, Регламент ЄС 2024/1257, відомий як **Euro 7**, передбачає вимоги до викидів транспортних засобів у реальних умовах експлуатації, а також охоплює невихлопні викиди, зокрема частинки від гальм і зношування шин.

Для теми бакалаврської роботи це має принципове значення, оскільки сучасна екологічна політика вже не обмежується лише аналізом вихлопних газів. Навіть за умови переходу на електромобілі залишаються актуальними проблеми зношування шин, дорожнього покриття, утворення пилу, транспортного шуму та впливу інфраструктури на міський мікроклімат. Тому нормативне регулювання має охоплювати як технічний стан транспортних засобів, так і організацію міського простору [2, 7].

Європейське регулювання якості атмосферного повітря також має важливе значення для України в умовах євроінтеграції. Директива ЄС 2024/2881 щодо якості атмосферного повітря передбачає боротьбу із забрудненням біля джерела, впровадження ефективних заходів на місцевому, національному та європейському рівнях, зокрема щодо викидів від транспорту, енергетики, промисловості, опалення й сільського господарства.

Таким чином, нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту охоплює кілька взаємопов'язаних рівнів. Перший рівень - це загальне природоохоронне законодавство, яке визначає необхідність охорони

атмосферного повітря. Другий рівень - санітарні та медико-санітарні нормативи, що встановлюють допустимі концентрації забруднювальних речовин у повітрі населених місць. Третій рівень - система державного моніторингу, яка забезпечує спостереження за станом атмосферного повітря. Четвертий рівень - вимоги до транспортних засобів, пального, технічного стану автомобілів і систем очищення відпрацьованих газів. П'ятий рівень - місцева політика сталої міської мобільності, яка включає розвиток громадського транспорту, велосипедної та пішохідної інфраструктури, озеленення, обмеження руху в перевантажених зонах і оптимізацію транспортних потоків [7, 14].

Для ефективного скорочення викидів автотранспорту в містах важливо не лише формально встановлювати нормативи, а й забезпечувати їхнє практичне виконання. Це передбачає регулярний технічний контроль транспортних засобів, використання якісного пального, оновлення громадського транспорту, контроль за фактичним рівнем забруднення повітря, екологічне планування міського простору та інформування населення про стан атмосферного повітря.

Отже, нормативно-правове регулювання є основою для впровадження технологій і заходів скорочення викидів автотранспорту. Воно визначає допустимі межі впливу на атмосферне повітря, встановлює вимоги до транспортних засобів, створює умови для моніторингу якості повітря та формує правові підстави для розвитку екологічно безпечної міської мобільності [1, 21].

Нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту в Україні базується на природоохоронному законодавстві, санітарних нормативах якості атмосферного повітря, системі державного моніторингу та вимогах до транспортних засобів. Важливе значення має Закон України «Про охорону атмосферного повітря», який передбачає заходи щодо зменшення забруднення від транспортних засобів, а також державні медико-санітарні нормативи допустимого вмісту забруднювальних речовин у повітрі населених місць. Європейські стандарти, зокрема Euro 7, демонструють сучасний підхід до

регулювання транспортних викидів, що включає не лише вихлопні гази, а й невихлопні джерела забруднення. Для міських територій ефективно нормативне регулювання має поєднувати технічні вимоги до транспорту, моніторинг якості повітря та заходи сталої міської мобільності [6, 23].

Висновки до розділу 1

У першому розділі бакалаврської роботи розглянуто теоретичні основи впливу автотранспорту на стан атмосферного повітря в межах міських територій. Встановлено, що автомобільний транспорт є одним із найбільш поширених джерел забруднення міського середовища, оскільки його викиди формуються безпосередньо в місцях проживання, праці, навчання та відпочинку населення [7, 21].

Автотранспорт створює комплексне екологічне навантаження на міські території. Його вплив пов'язаний не лише з вихлопними газами, а й із невихлопними джерелами забруднення: зношуванням шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття, повторним підніманням пилу, витоками паливно-мастильних матеріалів, шумом і тепловим навантаженням. Тому транспортне забруднення доцільно розглядати як багатофакторну проблему урбанізованого середовища [8, 27].

Основними забруднювальними речовинами у викидах автотранспорту є оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, леткі органічні сполуки, тверді частинки PM_{10} і $PM_{2.5}$, сажа, бензапірен і важкі метали. Ці речовини мають різне походження та різний характер впливу, однак у сукупності вони погіршують якість атмосферного повітря, створюють ризики для здоров'я населення і впливають на стан міських екосистем [9, 21].

Визначено, що транспортні викиди негативно впливають на органи дихання, серцево-судинну систему, загальне самопочуття та якість життя населення. Найбільш уразливими до дії забрудненого повітря є діти, люди похилого віку, вагітні жінки та особи з хронічними захворюваннями. Окрім впливу на людину, транспортне забруднення погіршує стан зелених насаджень, сприяє накопиченню важких металів і нафтопродуктів у ґрунтах,

знижує біологічну активність ґрунтового середовища та посилює несприятливі зміни міського мікроклімату [10, 21].

Проаналізовано, що нормативно-правове регулювання викидів автотранспорту в Україні ґрунтується на законодавстві у сфері охорони атмосферного повітря, санітарних нормативах, державному моніторингу та вимогах до транспортних засобів. Важливим напрямом є гармонізація українських підходів із європейськими екологічними стандартами, які передбачають поступове посилення вимог до викидів, контроль у реальних умовах експлуатації та врахування невихлопних джерел забруднення [13, 17].

Скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій є важливою умовою підвищення екологічної безпеки, поліпшення якості атмосферного повітря та створення комфортного міського середовища. Для досягнення цього необхідне поєднання технічних, організаційних, планувальних і природоохоронних заходів, зокрема модернізація транспортних засобів, розвиток громадського та електричного транспорту, оптимізація дорожнього руху, обмеження використання приватних автомобілів у перевантажених зонах, розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури, а також розширення зелених насаджень [14, 23].

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ АВТОТРАНСПОРТОМ У МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЯХ

2.1. Характеристика міської транспортної системи як чинника екологічного навантаження

Міська транспортна система є одним із ключових елементів функціонування сучасного міста, оскільки забезпечує переміщення населення, вантажів, доступ до місць праці, навчання, медичних, адміністративних, культурних і торговельних об'єктів. Водночас автотранспорт виступає важливим чинником екологічного навантаження на урбанізовані території. Його вплив проявляється через викиди забруднювальних речовин в атмосферне повітря, утворення шуму, пилу, вібрації, забруднення ґрунтів і поверхневого стоку, а також через зайняття значних площ під дороги, паркувальні майданчики й транспортну інфраструктуру [5, 14].

У межах міських територій транспортне навантаження формується під впливом кількох основних чинників: інтенсивності руху, структури автопарку, розташування основних транспортних магістралей, наявності заторів, організації паркування та рівня розвитку громадського транспорту. Саме поєднання цих чинників визначає масштаби забруднення атмосферного повітря автотранспортом і рівень екологічної небезпеки для населення [6, 19].

Одним із головних показників, що характеризує транспортну систему міста, є інтенсивність руху. Під інтенсивністю руху розуміють кількість транспортних засобів, які проходять через певну ділянку дороги за одиницю часу, наприклад за годину або добу. Чим вища інтенсивність руху, тим більші обсяги споживання пального та викидів забруднювальних речовин у повітря. Особливо високі рівні забруднення спостерігаються на магістральних вулицях, перехрестях, транспортних розв'язках, біля автостанцій, ринків, торговельних центрів, навчальних закладів і місць масового скупчення людей.

Для міських територій характерна нерівномірність транспортного

навантаження протягом доби. Найбільша інтенсивність руху зазвичай спостерігається в ранкові та вечірні години пік, коли населення переміщується до місць роботи, навчання або повертається додому. У цей період зростає кількість автомобілів на дорогах, збільшується тривалість поїздок, утворюються затори, а транспортні засоби частіше працюють у режимі розгону, гальмування та холостого ходу. Такі режими руху є екологічно несприятливими, оскільки супроводжуються підвищеним споживанням пального та збільшенням викидів оксиду вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів, твердих частинок і сажі [21, 25].

Важливим чинником екологічного навантаження є структура міського автопарку. Вона включає співвідношення легкових автомобілів, вантажного транспорту, автобусів, маршрутних таксі, мотоциклів, спеціалізованої техніки та електротранспорту. У більшості міст значну частку транспортного потоку становлять приватні легкові автомобілі. Їхня велика кількість призводить до перевантаження вулично-дорожньої мережі, збільшення потреби в паркувальних місцях, зростання заторів і підвищення загального рівня викидів [3, 8].

Окрему увагу слід приділяти віку та технічному стану транспортних засобів. Старі автомобілі, особливо ті, що не відповідають сучасним екологічним стандартам, можуть мати значно вищі питомі викиди забруднювальних речовин порівняно з новішими транспортними засобами. Несправність двигуна, паливної системи, каталізатора, сажового фільтра або системи очищення відпрацьованих газів призводить до збільшення токсичності вихлопу. Тому екологічне навантаження залежить не лише від кількості транспорту, а й від його якості, технічного обслуговування та типу пального [9, 24].

Значну роль у формуванні забруднення відіграють основні транспортні магістралі міста. Магістральні вулиці концентрують найбільші транспортні потоки, зокрема рух приватних автомобілів, громадського транспорту, вантажівок і транзитного транспорту. Уздовж таких вулиць часто розташовані

житлові будинки, магазини, офісні приміщення, навчальні заклади та зупинки громадського транспорту. Це посилює ризик впливу забрудненого повітря на населення, оскільки викиди автотранспорту надходять безпосередньо в приземний шар атмосфери, тобто на рівень дихання людини [7, 24].

Особливо небезпечними з екологічної точки зору є ділянки, де транспортний потік рухається нерівномірно: великі перехрестя, світлофори, кругові розв'язки, підйоми, вузькі вулиці, ділянки з частими пішохідними переходами та місця зупинки громадського транспорту. На таких ділянках транспортні засоби часто гальмують, розганяються або простоюють із працюючим двигуном. У результаті відбувається локальне підвищення концентрації забруднювальних речовин [9, 14].

Важливим елементом транспортної системи, який посилює екологічне навантаження, є заторність руху. Затори виникають через перевищення кількості автомобілів над пропускну здатністю вулиць, неефективну організацію дорожнього руху, недостатню кількість альтернативних маршрутів, неправильне паркування, дорожньо-ремонтні роботи або аварійні ситуації. У заторах автомобілі тривалий час працюють у режимі холостого ходу, періодично рушають і зупиняються, що призводить до неефективного спалювання пального та збільшення кількості викидів [10, 24].

З екологічної точки зору затори є особливо небезпечними, оскільки вони формують локальні зони підвищеного забруднення атмосферного повітря. У таких місцях зростають концентрації оксиду вуглецю, оксидів азоту, летких органічних сполук, твердих частинок і сажі. Крім того, затори погіршують якість життя населення, збільшують рівень шуму, спричиняють стрес, втрату часу та додаткові економічні витрати [14, 28].

Окремим чинником екологічного навантаження є паркування транспортних засобів. Недостатня кількість організованих паркувальних місць призводить до хаотичного паркування на узбіччях, тротуарах, газонах, у дворах і поблизу зупинок громадського транспорту. Таке паркування ускладнює рух пішоходів, погіршує умови для громадського транспорту,

зменшує пропускну здатність вулиць і може сприяти утворенню заторів. Крім того, паркування на зелених зонах призводить до ущільнення ґрунту, пошкодження трав'яного покриву, забруднення ґрунтів нафтопродуктами та важкими металами [25, 33].

Паркувальні майданчики також можуть бути джерелом локального забруднення повітря. Під час запуску двигуна, маневрування, прогрівання автомобіля та руху на низьких швидкостях викиди можуть бути відносно високими. Особливо це актуально для закритих або напівзакритих паркінгів, територій біля торговельних центрів, вокзалів, ринків і житлових комплексів [36, 40].

Суттєвий вплив на рівень транспортного забруднення має стан громадського транспорту. Громадський транспорт може виконувати як позитивну, так і негативну екологічну роль. З одного боку, добре організована система громадського транспорту зменшує потребу населення у використанні приватних автомобілів, знижує кількість транспортних засобів на дорогах і сприяє скороченню загальних викидів. З іншого боку, застарілі автобуси, маршрутні таксі або дизельний транспорт у поганому технічному стані можуть бути значними джерелами викидів оксидів азоту, сажі та твердих частинок [34, 40].

Найбільш екологічно доцільними видами громадського транспорту є електротранспорт: тролейбуси, трамваї, електробуси. Вони не створюють вихлопних газів безпосередньо в місці руху, що є важливим для зниження локального забруднення в межах міста. Однак ефективність громадського транспорту залежить не лише від типу транспортного засобу, а й від регулярності руху, зручності маршрутів, доступності зупинок, вартості проїзду, комфортності та швидкості перевезень. Якщо громадський транспорт є незручним або нерегулярним, населення частіше обирає приватний автомобіль, що збільшує транспортне навантаження (табл. 2.1) [31, 37].

Таблиця 2.1. Показники для оцінювання міської транспортної системи як чинника екологічного навантаження

Показник	Екологічне значення
Інтенсивність руху	Визначає кількість транспортних засобів, що формують викиди на певній ділянці дороги
Структура автопарку	Впливає на склад і обсяги викидів залежно від типу транспорту, пального та технічного стану
Наявність магістральних вулиць	Формує зони концентрації транспортних потоків і підвищеного забруднення
Частота заторів	Збільшує викиди через роботу двигунів у режимі холостого ходу та часті розгони
Організація паркування	Впливає на пропускну здатність вулиць, стан ґрунтів і зелених зон
Розвиток громадського транспорту	Може зменшувати використання приватних автомобілів і загальний рівень викидів
Наявність електротранспорту	Сприяє зниженню локального забруднення атмосферного повітря
Стан дорожнього покриття	Впливає на утворення пилу, зношування шин і витрати пального

Таким чином, міська транспортна система є складним джерелом екологічного навантаження, яке формується не лише за рахунок вихлопних газів автомобілів, а й через організацію руху, структуру автопарку, стан доріг, рівень розвитку громадського транспорту та особливості міського планування. Найбільше забруднення атмосферного повітря спостерігається в районах з інтенсивним рухом, частими заторами, високою часткою старих транспортних засобів і недостатнім розвитком альтернативних видів мобільності [36, 37].

Для зменшення екологічного навантаження необхідно комплексно вдосконалювати транспортну систему міста. До таких заходів належать оптимізація схем дорожнього руху, розвиток громадського та електричного транспорту, створення велосипедної та пішохідної інфраструктури,

обмеження транзитного руху через центральні райони, впорядкування паркування, оновлення автопарку та розширення зелених насаджень уздовж транспортних магістралей [37, 40].

Міська транспортна система є одним із основних чинників екологічного навантаження на атмосферне повітря урбанізованих територій. Інтенсивність руху, структура автопарку, наявність магістральних вулиць, затори, хаотичне паркування та недостатній розвиток громадського транспорту безпосередньо впливають на рівень забруднення повітря. Найбільш небезпечними є ділянки з високою концентрацією транспорту, частими зупинками та розгонами, оскільки саме там формуються локальні зони підвищеного забруднення. Тому характеристика транспортної системи є необхідним етапом аналізу стану забруднення атмосферного повітря автотранспортом у межах міських територій [33, 36].

2.2. Методика оцінювання викидів автотранспорту

Оцінювання викидів автотранспорту є важливим етапом аналізу стану забруднення атмосферного повітря в межах міських територій. Воно дає змогу визначити, які ділянки вулично-дорожньої мережі створюють найбільше екологічне навантаження, які типи транспортних засобів формують основну частку викидів, а також які заходи можуть бути найбільш ефективними для зменшення забруднення повітря [23, 26].

Методика оцінювання викидів автотранспорту ґрунтувалася на поєднанні розрахункових методів, статистичних даних, польових спостережень, підрахунку інтенсивності руху та аналізу структури транспортного потоку. Для роботи застосовували спрощений розрахунково-аналітичний підхід, який дозволяє оцінити рівень транспортного навантаження навіть за відсутності складного лабораторного обладнання [13, 37].

У міжнародній практиці для оцінювання викидів автотранспорту

широко використовують підхід, заснований на даних про транспортну активність і питомі коефіцієнти викидів. Саме такий принцип використовується в методичних документах ЕМЕР/ЕЕА щодо інвентаризації викидів забруднювальних речовин, які містять рекомендації для розрахунку атмосферних викидів за секторами, зокрема для дорожнього транспорту. Також у європейській практиці застосовується модель COPERT, яка призначена для розрахунку реальних викидів від дорожнього транспорту з урахуванням структури автопарку, пробігу, швидкості руху, виду пального та інших умов експлуатації [14, 34].

У межах бакалаврської роботи оцінювання викидів автотранспорту проводили за такою загальною послідовністю:

1. вибір досліджуваної міської території або окремих ділянок вулично-дорожньої мережі;
2. визначення точок спостереження;
3. підрахунок інтенсивності руху транспорту;
4. класифікація транспортних засобів за типами;
5. визначення середньої швидкості руху або характеру руху;
6. вибір коефіцієнтів викидів для окремих груп транспорту;
7. розрахунок орієнтовних викидів забруднювальних речовин;
8. аналіз отриманих результатів і визначення найбільш навантажених ділянок [11, 17].

Першим етапом є вибір досліджуваних ділянок. Для аналізу обирали території, де ймовірно формується підвищене транспортне навантаження: магістральні вулиці, великі перехрестя, ділянки поблизу автовокзалів, ринків, торговельних центрів, навчальних закладів, лікарень, житлових кварталів, зупинок громадського транспорту та місць утворення заторів. Порівнювали кілька типів ділянок: наприклад, центральну вулицю з інтенсивним рухом, житлову вулицю із середнім навантаженням і периферійну ділянку з меншим транспортним потоком [1, 4].

Другим етапом є збір статистичних даних. Для цього використовували

матеріали органів місцевого самоврядування, дані транспортних департаментів, статистичні відомості щодо кількості зареєстрованих транспортних засобів, плани сталої міської мобільності, схеми організації дорожнього руху, інформація про маршрути громадського транспорту, дані щодо паркування та заторів. Якщо для конкретного міста відсутні повні статистичні дані, їх можна доповнити власними польовими спостереженнями [11, 14].

Важливим етапом методики є польові спостереження. Вони проводилися безпосередньо на вибраних ділянках дороги з метою визначення фактичної інтенсивності руху та структури транспортного потоку. Польові спостереження здійснювали в різні періоди доби: у ранкову годину пік, денний період, вечірню годину пік і, за можливості, у вихідний день. Це дозволяє виявити добову нерівномірність транспортного навантаження [12, 22].

Під час польових спостережень фіксують:

- кількість транспортних засобів, що проїжджають через обрану ділянку;
- тип транспортного засобу;
- напрям руху;
- приблизну швидкість руху;
- наявність заторів;
- кількість зупинок і розгонів;
- роботу світлофорів;
- наявність зупинок громадського транспорту;
- стан дорожнього покриття;
- наявність зелених насаджень уздовж дороги [12, 33].

Основним показником, який визначається під час спостережень, є інтенсивність руху. Вона показує кількість транспортних засобів, що проходять через певний переріз дороги за одиницю часу. Найчастіше інтенсивність руху визначають за формулою:

$$I = \frac{N}{t}$$

де: **I** - інтенсивність руху, авт./год;

N - кількість транспортних засобів, зафіксованих під час спостереження;

t - тривалість спостереження, год [31, 37].

Наприклад, якщо за 20 хвилин через ділянку дороги проїхало 300 автомобілів, то інтенсивність руху становитиме:

$$I = \frac{300}{0,33} \approx 909 \text{ авт./год}$$

Отже, така ділянка може вважатися транспортно навантаженою, особливо якщо вона розташована поблизу житлової забудови або громадських об'єктів.

Для більш точного аналізу транспортний потік слід поділяти на окремі категорії. Це необхідно тому, що різні типи транспортних засобів мають різні обсяги та склад викидів. Наприклад, легкові автомобілі формують значну частку викидів через свою чисельність, дизельні автобуси та вантажівки є важливими джерелами оксидів азоту й твердих частинок, а електротранспорт не створює вихлопних газів безпосередньо в місці руху [34, 37].

Для бакалаврської роботи використовували класифікацію транспортних засобів табл.2.2

Таблиця 2.2. Класифікацію транспортних засобів

Категорія транспорту	Приклади	Екологічне значення
Легкові автомобілі	Приватні авто, таксі	Формують основну частину транспортного потоку
Мікроавтобуси	Маршрутні таксі, службові авто	Часто працюють у режимі частих зупинок і розгонів
Автобуси	Міські та приміські автобуси	Можуть бути джерелом NO_x , сажі та РМ за умови дизельного двигуна
Вантажні автомобілі	Легкі й важкі вантажівки	Мають вищі питомі викиди через масу та витрати пального
Мотоцикли та мопеди	Двоколісний моторизований	Можуть бути джерелом СО і вуглеводнів

	транспорт	
Електротранспорт	Тролейбуси, трамваї, електробуси	Не створює вихлопних газів у місці експлуатації
Спецтехніка	Комунальна, будівельна техніка	Може мати високі викиди за умови старого дизельного двигуна

Після визначення інтенсивності руху та структури транспортного потоку можна перейти до розрахунку орієнтовних викидів. Загальний принцип розрахунку полягає в тому, що кількість транспортних засобів певної категорії множиться на довжину досліджуваної ділянки та питомий коефіцієнт викиду певної речовини. У спрощеному вигляді формула може мати такий вигляд:

$$E_i = \sum (N_j \cdot L \cdot K_{ij})$$

де: E_i - маса викиду i -тої забруднювальної речовини;

N_j - кількість транспортних засобів j -тої категорії;

L - довжина досліджуваної ділянки, км;

K_{ij} - питомий коефіцієнт викиду i -тої речовини для j -тої категорії транспорту, г/км [23, 26].

Якщо дослідження проводиться для кількох категорій транспорту, розрахунок виконують окремо для легкових автомобілів, автобусів, вантажівок, мікроавтобусів та інших груп, після чого результати підсумовують. Такий підхід дозволяє не лише оцінити загальний обсяг викидів, а й визначити, який тип транспорту створює найбільше навантаження [24, 29].

Для оцінювання викидів використовувалися основні забруднювальні речовини табл.2.3.

Таблиця 2.3. Основні забруднювальні речовини

Забруднювальна речовина	Доцільність оцінювання
СО	Показує рівень неповного згоряння пального

CO ₂	Характеризує кліматичний вплив транспорту
NO _x	Важливий показник забруднення від двигунів внутрішнього згоряння
Вуглеводні / ЛОС	Пов'язані з неповним згорянням і випаровуванням пального
PM ₁₀ і PM _{2.5}	Відображають пилове та аерозольне забруднення
Сажа	Особливо характерна для дизельного транспорту
Бензапірен	Показник канцерогенно небезпечного забруднення
Важкі метали	Пов'язані з вихлопними та невихлопними джерелами

Окрему увагу приділяли режиму руху транспорту. Рівномірний рух із помірною швидкістю є екологічно сприятливішим, ніж часті зупинки, розгони та робота двигуна на холостому ходу. Саме тому під час спостережень слід фіксувати наявність заторів, роботу світлофорів, кількість пішохідних переходів, зупинок громадського транспорту та місць хаотичного паркування. Ці чинники пояснюють, чому навіть за однакової кількості автомобілів різні ділянки міста можуть мати різний рівень забруднення [33, 36].

Для оцінювання викидів використовували кілька методичних підходів табл. 2.4.

Таблиця 2.4 оцінювання викидів

Метод оцінювання	Суть методу	Доцільність використання
Статистичний метод	Аналіз даних про кількість транспорту, паливо, пробіг, маршрути	Доцільний для загальної характеристики міста
Розрахунковий метод	Розрахунок викидів за коефіцієнтами емісії	Основний метод для бакалаврської роботи
Польові спостереження	Підрахунок транспорту на вибраних ділянках	Дає фактичні дані для конкретної території
Порівняльний	Порівняння різних вулиць	Дозволяє визначити

метод	або районів міста	найбільш проблемні ділянки
Картографічний метод	Нанесення джерел забруднення на карту	Дає змогу візуалізувати екологічне навантаження
Інструментальний метод	Вимірювання концентрацій забруднювачів приладами	Найточніший, але потребує обладнання

Для бакалаврської роботи найбільш доступним і практичним є поєднання польових спостережень, підрахунку інтенсивності руху та розрахункового методу. Такий підхід дозволяє отримати власні дані, проаналізувати реальний стан транспортного навантаження та зробити обґрунтовані висновки щодо екологічної ситуації на досліджуваній території [34, 38].

Польові спостереження оформлювали у вигляді таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Польові спостереження

Дата	Час	Місце спостереження	Легкові авто	Автобуси	Вантажівки	Мікроавтобуси	Інші	Усього
	08:00–08:20	Перехрестя №1						
	13:00–13:20	Перехрестя №1						
	17:00–17:20	Перехрестя №1						

На основі такої таблиці можна визначити середню інтенсивність руху за годину, частку кожної категорії транспорту та порівняти навантаження в різні періоди доби. Наприклад, якщо в ранкову годину пік кількість транспорту вдвічі більша, ніж у денний період, можна зробити висновок про нерівномірність транспортного навантаження та підвищений ризик забруднення саме в години пік [36, 40].

Для оцінки структури транспортного потоку можна використовувати

формулу:

$$P_j = \frac{N_j}{N_{\text{заг}}} \cdot 100\%$$

де: P_j - частка транспортних засобів j -тої категорії, %;

N_j - кількість транспортних засобів j -тої категорії;

$N_{\text{заг}}$ - загальна кількість транспортних засобів.

Цей показник дозволяє визначити, які транспортні засоби переважають на досліджуваній ділянці. Наприклад, якщо частка легкових автомобілів становить 80–90 %, то основним напрямом зниження навантаження може бути розвиток громадського транспорту, велоінфраструктури та обмеження надмірного використання приватних автомобілів. Якщо значну частку становлять вантажні автомобілі, доцільно розглядати питання обмеження вантажного руху в центральних або житлових районах [26, 40].

Результати оцінювання викидів доцільно подавати у вигляді таблиць, діаграм і картосхем. Наприклад, можна побудувати:

- діаграму структури транспортного потоку;
- графік зміни інтенсивності руху протягом доби;
- таблицю розрахункових викидів CO, NO_x, PM і CO₂;
- карту ділянок із високим, середнім і низьким транспортним навантаженням;
- порівняльну таблицю забруднення на різних вулицях [35, 37].

Під час аналізу результатів важливо враховувати не лише кількість транспорту, а й умови руху. Ділянка з меншою кількістю автомобілів, але з постійними заторами, світлофорами та частими зупинками може мати вищий рівень викидів, ніж ділянка з більшим, але рівномірним рухом. Саме тому методика оцінювання має бути комплексною та враховувати як кількісні, так і якісні характеристики транспортного потоку [14, 36].

У межах бакалаврської роботи застосували практичну схему дослідження

2.6

Таблиця 2.6. Практична схема дослідження

Етап	Зміст роботи	Очікуваний результат
1	Вибір 3–5 ділянок міста для спостереження	Визначення територій з різним транспортним навантаженням
2	Проведення підрахунку транспорту в різні періоди доби	Отримання даних про інтенсивність руху
3	Класифікація транспорту за типами	Визначення структури транспортного потоку
4	Оцінка умов руху	Виявлення заторів, зупинок, світлофорів, паркування
5	Розрахунок орієнтовних викидів	Визначення рівня екологічного навантаження
6	Порівняння ділянок	Встановлення найбільш проблемних зон
7	Формування рекомендацій	Обґрунтування заходів скорочення викидів

Таким чином, методика оцінювання викидів автотранспорту повинна поєднувати збір статистичних даних, польові спостереження та розрахунковий аналіз. Такий підхід дозволяє отримати об'єктивне уявлення про транспортне навантаження на міську територію, визначити основні джерела забруднення та підготувати практичні рекомендації щодо зменшення викидів [19, 29].

Оцінювання викидів автотранспорту в межах міських територій доцільно проводити на основі комплексної методики, яка включає аналіз статистичних даних, польові спостереження, підрахунок інтенсивності руху, класифікацію транспортних засобів і розрахунок викидів за питомими коефіцієнтами. Основними показниками для аналізу є кількість транспортних засобів, структура транспортного потоку, довжина досліджуваної ділянки, режим руху та тип пального. Така методика дозволяє визначити найбільш навантажені ділянки міста, оцінити внесок різних категорій транспорту в забруднення атмосферного повітря та обґрунтувати заходи щодо скорочення викидів [1, 9].

2.3. Оцінка екологічних ризиків від викидів автотранспорту

Оцінка екологічних ризиків від викидів автотранспорту є важливим етапом аналізу стану атмосферного повітря в межах міських територій. Вона дозволяє визначити не лише сам факт забруднення, а й можливі наслідки цього забруднення для населення, міських екосистем і якості життя. Особливої уваги потребують території, де джерела транспортних викидів розташовані безпосередньо поруч із місцями постійного або тривалого перебування людей: житловими будинками, школами, дитячими садками, лікарнями, парками, зупинками громадського транспорту та громадськими просторами [14, 35].

Екологічний ризик у контексті транспортного забруднення можна розглядати як імовірність негативного впливу забруднювальних речовин на здоров'я населення та стан довкілля. Рівень такого ризику залежить від інтенсивності транспортного руху, складу транспортного потоку, технічного стану автомобілів, режиму руху, метеорологічних умов, щільності забудови, наявності зелених насаджень і відстані між дорогою та об'єктами житлової чи соціальної інфраструктури [34, 39].

Основними забруднювальними речовинами, які формують екологічні ризики від автотранспорту, є оксид вуглецю, оксиди азоту, тверді частинки PM_{10} і $PM_{2.5}$, сажа, леткі органічні сполуки, бензапірен, діоксид вуглецю та важкі метали. Частина цих речовин має гострий вплив, тобто може викликати погіршення самопочуття при короткочасному підвищенні концентрацій. Інші речовини є небезпечними через тривалий накопичувальний вплив, особливо у випадку постійного проживання або навчання поблизу інтенсивних транспортних магістралей [25, 36].

Найбільш вразливими до дії транспортних викидів є діти, люди похилого віку, вагітні жінки, особи з хронічними захворюваннями органів дихання, серцево-судинної системи та люди зі зниженим імунітетом. Для цих груп населення навіть помірне забруднення атмосферного повітря може

створювати додаткове навантаження на організм. Саме тому оцінка екологічних ризиків має враховувати не лише рівень забруднення, а й соціальну чутливість території [27, 33].

Особливо небезпечними є райони житлової забудови, розташовані вздовж вулиць з інтенсивним рухом. У таких районах населення може зазнавати тривалого щоденного впливу вихлопних газів, дорожнього пилу, шуму та вібрації. Якщо житлові будинки розміщені близько до проїжджої частини, а між дорогою та будинками відсутні зелені насадження або захисні смуги, ризик впливу транспортного забруднення зростає. Забруднювальні речовини можуть проникати у квартири через відкриті вікна, вентиляційні канали та накопичуватися у приземному шарі повітря [25, 33].

У районах щільної багатоповерхової забудови може формуватися ефект «вуличного каньйону», коли будівлі з обох боків дороги обмежують повітрообмін. У таких умовах вихлопні гази та пил гірше розсіюються, а концентрації забруднювальних речовин можуть залишатися підвищеними протягом тривалого часу. Це особливо характерно для центральних районів міст, де поєднуються вузькі вулиці, висока інтенсивність руху, затори та недостатня кількість зелених насаджень [33, 35].

Окрему групу територій підвищеного ризику становлять школи, дитячі садки та інші заклади освіти, розташовані поблизу доріг з інтенсивним рухом. Діти є особливо чутливою групою населення, оскільки їхній організм перебуває на етапі розвитку, а дихальна система є більш вразливою до дії забруднювальних речовин. Крім того, діти часто перебувають на відкритому повітрі під час перерв, прогулянок або занять фізичною культурою, що може збільшувати контакт із забрудненим повітрям [34, 36].

Для шкіл і дитячих садків важливо враховувати не лише відстань до дороги, а й наявність зелених насаджень, розташування спортивних майданчиків, напрям переважаючих вітрів і місця зупинки автомобілів батьків або шкільного транспорту. Якщо біля навчального закладу вранці та після завершення занять утворюються скупчення автомобілів, це може створювати

короткочасні, але регулярні піки забруднення [31, 37].

Підвищені екологічні ризики характерні також для лікарень, поліклінік та інших медичних закладів. На цих територіях перебувають люди з ослабленим здоров'ям, пацієнти із захворюваннями органів дихання, серцево-судинної системи, люди похилого віку та інші вразливі групи. Наявність інтенсивного транспортного руху біля медичних закладів може негативно впливати на умови лікування, відновлення та перебування пацієнтів [27, 35].

Особливо несприятливою є ситуація, коли лікарня або поліклініка розташована біля магістральної дороги, великого перехрестя, зупинки громадського транспорту або парковки. У таких умовах пацієнти та працівники закладу можуть зазнавати впливу вихлопних газів, шуму, пилу та неприємних запахів. Тому для медичних закладів бажаними є санітарно-захисні зелені зони, обмеження транзитного руху поблизу території та впорядковане паркування [25, 28].

Важливе значення мають також парки, сквери та рекреаційні території. Вони виконують функцію відпочинку, оздоровлення, покращення мікроклімату та часткового очищення повітря. Однак якщо парк або сквер розташований поряд із завантаженою дорогою, його оздоровча функція може знижуватися. Забруднене повітря, пил і шум погіршують комфортність перебування людей, а забруднювальні речовини осідають на листках рослин, ґрунті та покритті доріжок [24, 25].

Зелені насадження здатні частково затримувати пил і зменшувати поширення забруднення, проте вони не можуть повністю нейтралізувати вплив інтенсивного транспортного потоку. Тому рекреаційні території потребують правильного планування: бажано створювати захисні зелені смуги вздовж доріг, розміщувати дитячі та спортивні майданчики подалі від проїжджої частини, використовувати стійкі до забруднення види дерев і кущів [21, 33].

До зон підвищеного ризику належать і громадські простори: площі, пішохідні зони, зупинки громадського транспорту, ринки, території біля

торговельних центрів, вокзалів та адміністративних будівель. У таких місцях одночасно спостерігається велика кількість людей і значне транспортне навантаження. Люди можуть тривалий час перебувати біля дороги під час очікування транспорту, переходу вулиці, купівлі товарів або відпочинку [21, 27].

Особливо несприятливою є ситуація на зупинках громадського транспорту, де автобуси й маршрутні таксі часто зупиняються, рушають, працюють на холостому ходу та створюють локальні викиди. Якщо зупинка розташована біля перехрестя або у вузькому вуличному просторі, забруднення може накопичуватися, а пасажери безпосередньо перебувають у зоні впливу вихлопних газів [17, 32].

Для оцінки екологічних ризиків від транспортних викидів доцільно враховувати основні чинники

Таблиця 2.7. Оцінки екологічних ризиків від транспортних викидів

Чинник ризику	Характеристика впливу
Висока інтенсивність руху	Збільшує загальні обсяги викидів
Затори та часті зупинки	Підвищують викиди через роботу двигуна на холостому ходу
Велика частка дизельного транспорту	Збільшує ризик викидів NO _x , сажі та твердих частинок
Близькість дороги до житлових будинків	Підвищує тривалість впливу на населення
Розташування шкіл і лікарень біля магістралей	Підвищує ризики для вразливих груп населення
Недостатнє озеленення	Зменшує природне затримання пилу та погіршує мікроклімат
Щільна забудова	Ускладнює розсіювання забруднювальних речовин
Хаотичне паркування	Сприяє заторам і локальному забрудненню

Для практичної частини бакалаврської роботи можна використати спрощену бальну оцінку екологічного ризику. Кожну досліджувану ділянку міста доцільно оцінити за кількома критеріями: інтенсивність руху, наявність заторів, близькість до житлової забудови, наявність шкіл або лікарень, рівень озеленення, умови провітрювання та частка громадського або вантажного транспорту [15, 27].

Таблиця 2.8. Приклад шкали оцінювання екологічного ризику

Критерій	Низький ризик - 1 бал	Середній ризик - 2 бали	Високий ризик - 3 бали
Інтенсивність руху	Низька	Середня	Висока
Затори	Відсутні	Періодичні	Постійні
Відстань до житлової забудови	Понад 100 м	50–100 м	Менше 50 м
Наявність шкіл, лікарень, дитсадків	Відсутні	На відстані 100–300 м	Безпосередньо поруч
Озеленення	Достатнє	Часткове	Недостатнє або відсутнє
Умови провітрювання	Добрі	Обмежені	Погані
Частка дизельного/вантажного транспорту	Низька	Середня	Висока

Після оцінювання за всіма критеріями підраховують суму балів. Чим вища сума, тим більший рівень екологічного ризику для населення та міського середовища [31, 37].

Таблиця 2.9. Рівень екологічного ризику

Сума балів	Рівень екологічного ризику	Характеристика
7–10	Низький	Територія має помірне транспортне

		навантаження, достатнє озеленення та незначний вплив на населення
11–15	Середній	Є окремі чинники ризику: періодичні затори, близькість забудови або недостатнє озеленення
16–21	Високий	Територія має значне транспортне навантаження, близькість до чутливих об'єктів і погані умови розсіювання забруднень

Для зручності результати оцінки можна подати у вигляді таблиці 2.10

Таблиця 2.10. Результати оцінки

Досліджувана ділянка	Інтенсивність руху	Затори	Чутливі об'єкти поблизу	Озеленення	Провітрювання	Загальний рівень ризику
Магістраль біля житлової забудови	3	3	2	2	2	Високий
Перехрестя біля школи	3	2	3	2	2	Високий
Вулиця біля лікарні	2	2	3	2	2	Середній / високий
Дорога біля парку	2	1	2	1	1	Середній
Житлова вулиця з низьким рухом	1	1	1	1	1	Низький

Така оцінка дозволяє визначити пріоритетні території, де необхідно

впроваджувати природоохоронні та транспортно-організаційні заходи. Наприклад, для ділянок із високим ризиком доцільними є обмеження швидкості руху, заборона транзитного вантажного транспорту, створення зелених захисних смуг, упорядкування паркування, перенесення зупинок громадського транспорту подалі від входів до шкіл або лікарень, оновлення громадського транспорту та оптимізація світлофорного регулювання [14, 27].

У районах житлової забудови важливими заходами є зниження інтенсивності транзитного руху, створення зон спокійного руху, розвиток пішохідної та велосипедної інфраструктури, озеленення дворів і вулиць, заборона паркування на газонах та обмеження тривалої роботи двигунів на холостому ходу. Для шкіл і дитячих садків доцільно створювати безпечні підходи, зелені бар'єри, обмежувати рух автомобілів біля входів і організовувати місця короткочасної зупинки так, щоб вони не створювали заторів [14, 17].

Для лікарень і медичних закладів важливо забезпечити зниження транспортного навантаження біля основних корпусів, організувати паркування таким чином, щоб мінімізувати накопичення автомобілів біля входів, а також розвивати озеленення території. Для парків і громадських просторів необхідно зменшувати вплив магістральних доріг шляхом створення буферних зелених зон, висадження дерев і кущів, обмеження руху транспорту в рекреаційних зонах та покращення умов для пішоходів [31, 37].

Отже, екологічні ризики від викидів автотранспорту в містах мають просторово нерівномірний характер. Найбільші ризики формуються там, де висока інтенсивність руху поєднується з великою кількістю людей і наявністю вразливих об'єктів. Тому оцінка ризику повинна враховувати не лише транспортні показники, а й соціальну значущість території [21, 27].

Екологічні ризики від викидів автотранспорту є найбільш значними в районах житлової забудови, поблизу шкіл, дитячих садків, лікарень, парків, зупинок громадського транспорту та громадських просторів. Основними чинниками ризику є висока інтенсивність руху, затори, значна частка

дизельного транспорту, близькість дороги до місць перебування людей, недостатнє озеленення та погані умови провітрювання. Найбільш уразливими до впливу транспортного забруднення є діти, люди похилого віку, пацієнти медичних закладів і особи з хронічними захворюваннями. Для зменшення екологічних ризиків необхідно впроваджувати комплексні заходи: оптимізувати дорожній рух, обмежувати транзитний транспорт у житлових районах, розвивати громадський і електричний транспорт, створювати зелені захисні смуги та підвищувати якість міського планування. [11, 17]

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

ОЦІНЮВАННЯ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ В

М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬКУ

Метою експериментальної частини було визначення орієнтовного рівня транспортного навантаження та розрахунок викидів основних забруднювальних речовин від автотранспорту на окремих ділянках вулично-дорожньої мережі м. Івано-Франківська.

Для дослідження було обрано три ділянки міста з різним характером транспортного потоку:

П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька

Центральна частина міста, інтенсивний рух легкового та громадського транспорту.

П2 - вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу

Ділянка з активним рухом громадського транспорту, таксі та приватних автомобілів.

П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста

Ділянка з підвищеною часткою вантажного транспорту та транзитного руху.

Довжину кожної досліджуваної ділянки прийнято 0,5 км.

Формула розрахунку викидів

Розрахунок орієнтовної маси викидів здійснювався за формулою:

$$E_i = \sum_j N_j \cdot L \cdot K_{ij}$$

де: E_i - маса викиду i -тої забруднювальної речовини, г/год;

N_j - кількість транспортних засобів j -тої категорії за годину;

L - довжина досліджуваної ділянки, км;

K_{ij} - питомий коефіцієнт викиду i -тої речовини для j -тої категорії транспорту, г/км

Таблиця 3.1. Результати польових спостережень за інтенсивністю руху транспорту в м. Івано-Франківську

Ділянка	Час	Легкові авто	Автобуси	Вантажівки	Мікро автобуси	Інші	Усього
---------	-----	--------------	----------	------------	----------------	------	--------

П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	08:00– 08:20	285	18	14	20	8	345
П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	13:00– 13:20	210	14	10	15	6	255
П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	17:00– 17:20	330	20	16	25	10	401
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	08:00– 08:20	240	16	10	18	7	291
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	13:00– 13:20	185	12	8	14	5	224
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	17:00– 17:20	280	18	12	21	8	339
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	08:00– 08:20	210	14	22	16	6	268
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	13:00– 13:20	170	10	18	12	5	215
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	17:00– 17:20	250	15	26	18	7	316

Перерахунок інтенсивності руху за годину

Оскільки спостереження проводилися протягом 20 хвилин, для визначення годинної інтенсивності середнє значення множили на 3.

Таблиця 3.2. Середня інтенсивність руху транспорту за годину

Ділянка	Легков і авто	Автобус и	Вантажівк и	Мікроав тобуси	Інші	Усього за годину
---------	------------------	--------------	----------------	-------------------	------	---------------------

П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	825	52	40	60	24	1001
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	705	46	30	53	20	854
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	630	39	66	46	18	799

Найбільша середня інтенсивність руху спостерігається на ділянці П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька, де за годину проходить орієнтовно 1001 транспортний засіб. Це пояснюється центральним розташуванням ділянки, наявністю громадського транспорту, пішохідних переходів, світлофорного регулювання та високою концентрацією приватного автотранспорту.

Таблиця 3.3. Структура транспортного потоку, %

Ділянка	Легкові авто, %	Автобуси, %	Вантажівки, %	Мікроавтобуси, %	Інші, %
П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	82,4	5,2	4,0	6,0	2,4
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	82,6	5,4	3,5	6,2	2,3
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	78,8	4,9	8,3	5,8	2,3

Аналіз структури транспортного потоку показує, що на всіх досліджуваних ділянках переважають легкові автомобілі. Їхня частка становить від 78,8 % до 82,6 %. Найбільша частка вантажного транспорту зафіксована на ділянці П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста, де вона становить 8,3 %. Це свідчить про більший вплив транзитного та вантажного

руху на цій ділянці.

Таблиця 3.4. Питомі коефіцієнти викидів, використані для розрахунку

Категорія транспорту	CO, г/км	CO ₂ , г/км	NO _x , г/км	PM _{2.5} , г/км
Легкові авто	1,5	180	0,25	0,015
Автобуси	3,0	900	5,00	0,100
Вантажівки	2,5	750	4,00	0,080
Мікроавтобуси	1,8	280	0,80	0,040
Інші	1,0	120	0,15	0,010

Приклад розрахунку для ділянки П1

Для ділянки П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька кількість легкових автомобілів становить 825 авто/год, довжина ділянки - 0,5 км, питомий коефіцієнт викиду CO₂ для легкового автомобіля - 180 г/км.

Розрахунок CO₂ від легкових автомобілів:

$$ECO_2 = 825 \times 0,5 \times 180 = 74\,250 \text{ г/год} = 74,25 \text{ кг/год}$$

Аналогічно розрахунок виконано для автобусів, вантажівок, мікроавтобусів та інших транспортних засобів, після чого результати підсумовано.

Таблиця 3.5. Розрахункові викиди забруднювальних речовин на досліджуваних ділянках м. Івано-Франківська

Ділянка	CO, г/год	CO ₂ , г/год	CO ₂ , кг/год	NO _x , г/год
П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	812,75	122 490	122,49	338,92
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	692,95	104 020	104,02	285,82
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	663,90	106 520	106,52	328,00

За результатами розрахунків встановлено, що найбільші сумарні викиди CO₂

характерні для ділянки П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька. Орієнтовний обсяг викидів CO₂ на цій ділянці становить 122,49 кг/год. Це пов'язано з найвищою інтенсивністю руху - близько 1001 транспортного засобу за годину.

На ділянці П2 - вул. Вовчинецька – район вокзалу розрахункові викиди CO₂ становлять 104,02 кг/год. Незважаючи на дещо нижчу інтенсивність руху порівняно з центральною частиною міста, ця ділянка має важливе транспортне значення через близькість до залізничного вокзалу та активний рух громадського транспорту.

На ділянці П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста загальна кількість транспорту є меншою, ніж на ділянці П1, однак викиди NO_x становлять 328,00 г/год, що майже наближається до показника центральної ділянки. Це пояснюється більшою часткою вантажного транспорту, який має вищі питомі коефіцієнти викидів оксидів азоту та твердих частинок.

Таблиця 3.6. Порівняльна оцінка екологічного навантаження

Ділянка	Рівень транспортного навантаження	Основна причина забруднення	Екологічна оцінка
П1: вул. Незалежності – вул. Галицька	Високий	Велика кількість легкових авто та громадського транспорту	Найбільш навантажена ділянка
П2: вул. Вовчинецька – район вокзалу	Середньо-високий	Активний рух легкових авто, автобусів і мікроавтобусів	Значне локальне навантаження
П3: вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста	Середній	Вища частка вантажівок	Підвищені викиди NO _x і PM _{2.5}

Досліджувані ділянки: П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька; П2 -

вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу; ПЗ - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста.

Для побудови графіків використано результати підрахунку транспортних засобів у три періоди доби: ранковий, обідній і вечірній. Такий підхід дозволяє оцінити добову нерівномірність руху та визначити години найбільшого екологічного навантаження.

Таблиця 3.7. Інтенсивність транспортного потоку на досліджуваних ділянках

Ділянка	08:00–08:20	13:00–13:20	17:00–17:20	Середнє, авто/год
П1	345	255	401	1001
П2	291	224	339	854
ПЗ	268	215	316	799

Найбільша середня годинна інтенсивність руху встановлена на ділянці П1 - 1001 авто/год. На ділянці П2 цей показник становить 854 авто/год, а на ПЗ - 799 авто/год. Отже, центральна ділянка П1 має найвище транспортне навантаження.

Таблиця 3.8. Структура транспортного потоку на досліджуваних ділянках

Категорія транспорту	П1, %	П2, %	ПЗ, %
Легкові авто	82.4	82.6	78.8
Автобуси	5.2	5.4	4.9
Вантажівки	4.0	3.5	8.3
Мікроавтобуси	6.0	6.2	5.8
Інші	2.4	2.3	2.3

У структурі транспортного потоку на всіх ділянках переважають легкові автомобілі. Їхня частка становить 82,4 % на П1, 82,6 % на П2 і 78,8 % на ПЗ. Найвища частка вантажівок зафіксована на ПЗ - 8,3 %, що свідчить про вплив транзитного та вантажного руху.

Таблиця 3.9. Розрахункові викиди забруднювальних речовин

Ділянка	CO, г/год	CO ₂ , кг/год	NO _x , г/год	PM _{2.5} , г/год
П1	812,75	122,49	338,92	11,71
П2	692,95	104,02	285,82	9,95
П3	663,90	106,52	328,00	10,33

Розрахункові дані показують, що за більшістю показників найвищі викиди характерні для ділянки П1. Водночас ділянка П3, незважаючи на нижчу інтенсивність руху, має високі викиди NO_x і PM_{2.5}, що пояснюється більшою часткою вантажного транспорту.



Рис. 3.1. Визначаємо шум по вулиці Набережна

Середня інтенсивність руху для трьох досліджуваних ділянок становить 884,7 авто/год. Максимальне значення зафіксовано на П1 - 1001 авто/год, мінімальне на П3 - 799 авто/год. Діапазон коливань між найбільш і найменш завантаженою ділянками становить 202 авто/год.

Інтенсивність руху на П1 є на 17,2 % вищою, ніж на П2, і на 25,3 % вищою, ніж на П3. Це підтверджує, що центральна частина міста формує найбільше транспортне навантаження, пов'язане з перехрестями, світлофорами, громадським транспортом і приватними автомобілями.

Сумарно за 20 хвилин у ранковий період на трьох ділянках було зафіксовано 904 транспортні засоби, в обідній період - 694, а у вечірній період - 1056. Вечірній транспортний потік є на 51,9 % вищим порівняно з обіднім періодом, що свідчить про істотне зростання навантаження в години пік.



Рис.3.2. Визначаємо шум по вулиці Галицька

Викиди CO_2 на П1 становлять 122,49 кг/год, що на 17,8 % більше, ніж на П2, і на 15,0 % більше, ніж на П3. За викидами СО найбільше навантаження також припадає на П1 - 812,75 г/год. За NO_x ділянка П3 наближається до П1: різниця становить лише 10,92 г/год, або близько 3,3 %. Це демонструє важливість урахування структури транспортного потоку, а не тільки загальної кількості автомобілів.

Картосхема досліджуваних ділянок м. Івано-Франківська



Схема має ілюстративний характер і показує функціональну відмінність ділянок спостереження.

Рисунок 3.2 Картосхема досліджуваних ділянок м. Івано-Франківська

Картосхема показує функціональні відмінності між ділянками:
центральна зона, транспортний вузол біля вокзалу та в'їзд/виїзд з міста.

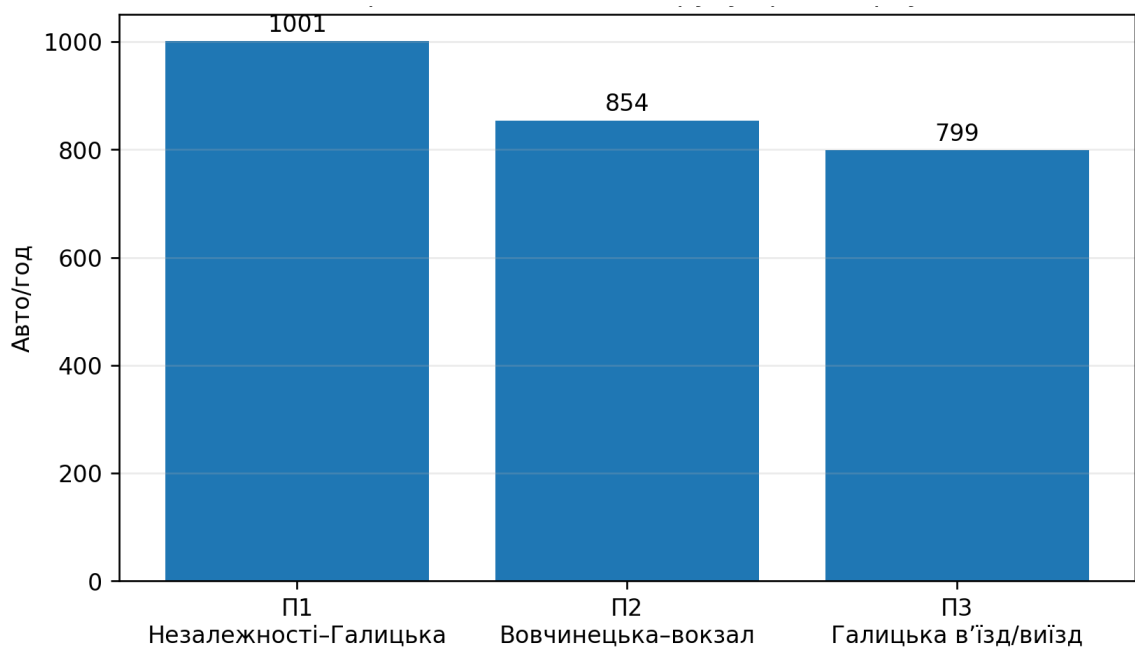


Рисунок 3.3 Середня інтенсивність руху транспорту на досліджуваних ділянках

Графік демонструє, що найвищу середню інтенсивність руху має ділянка П1 - 1001 авто/год.

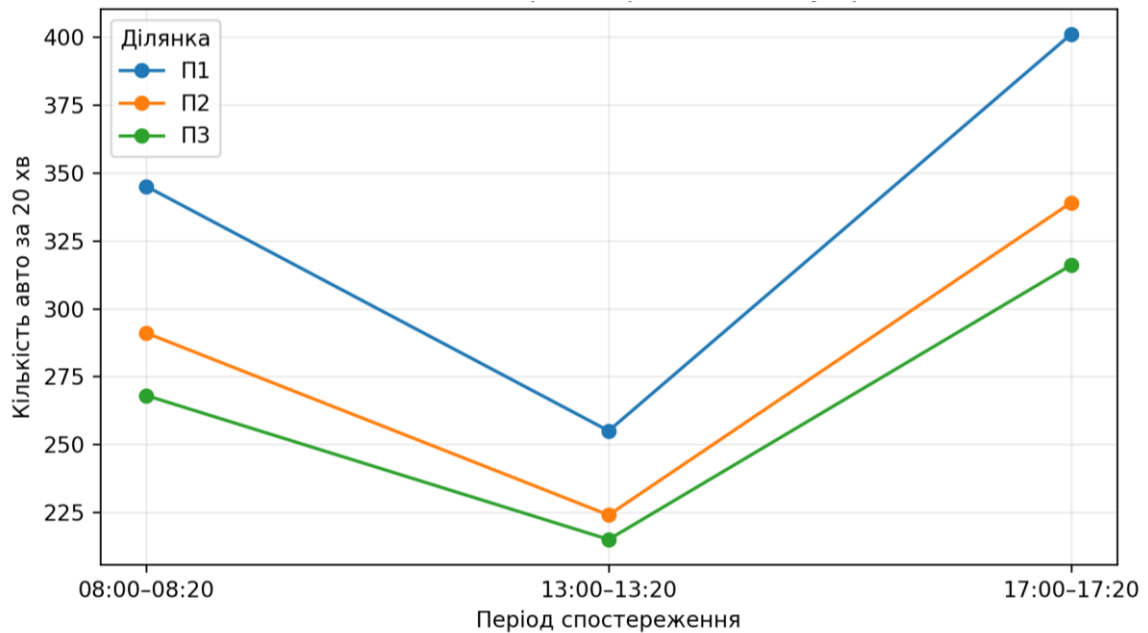


Рисунок 3.4. Динаміка інтенсивності транспортного потоку протягом доби

Лінійний графік показує нерівномірність руху протягом доби.

Максимальне навантаження спостерігається у вечірній період.

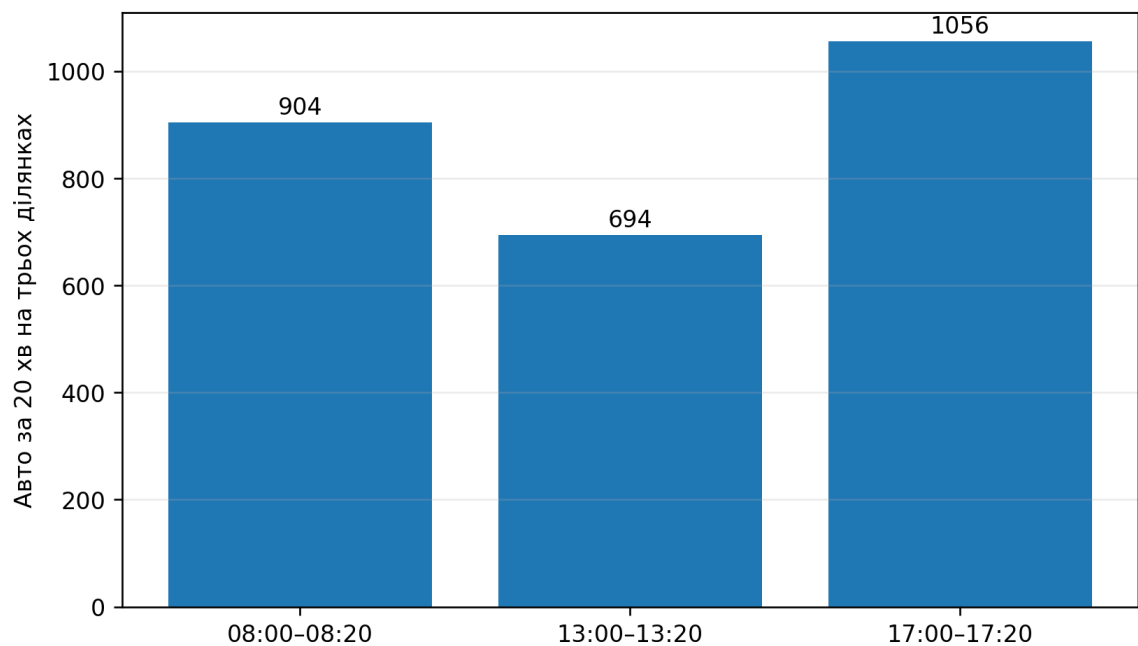


Рисунок 3.5 Сумарне транспортне навантаження за періодами спостереження

Сумарний графік підтверджує, що вечірній період є найбільш проблемним за кількістю транспортних засобів.

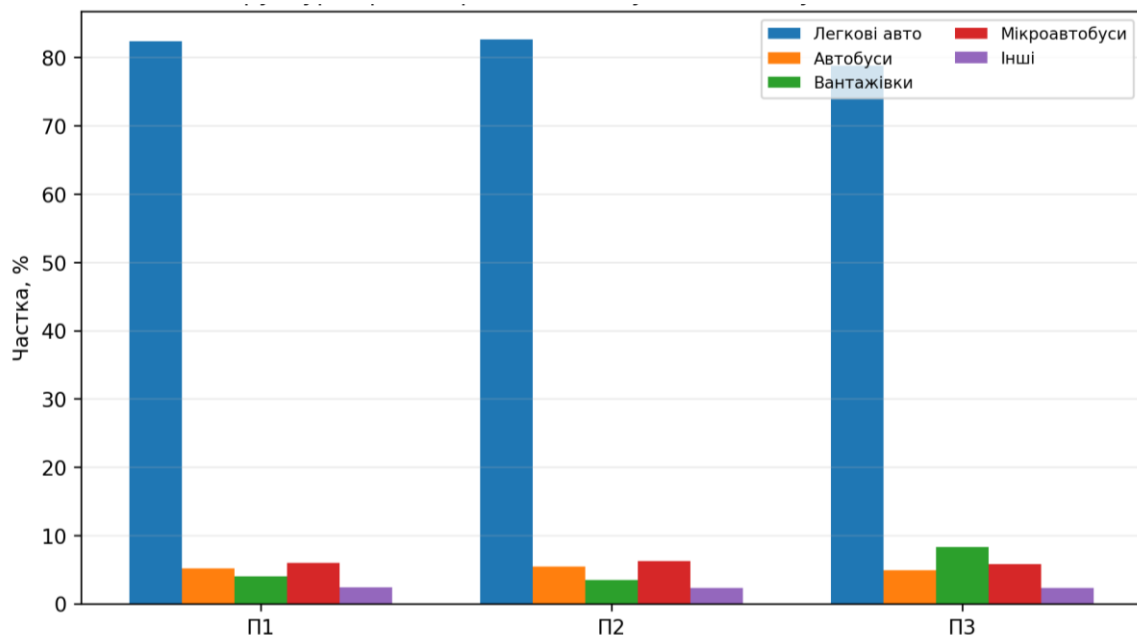


Рисунок 3.6 Структура транспортного потоку на досліджуваних ділянках

Діаграма показує переважання легкових автомобілів на всіх ділянках і підвищену частку вантажівок на П3.

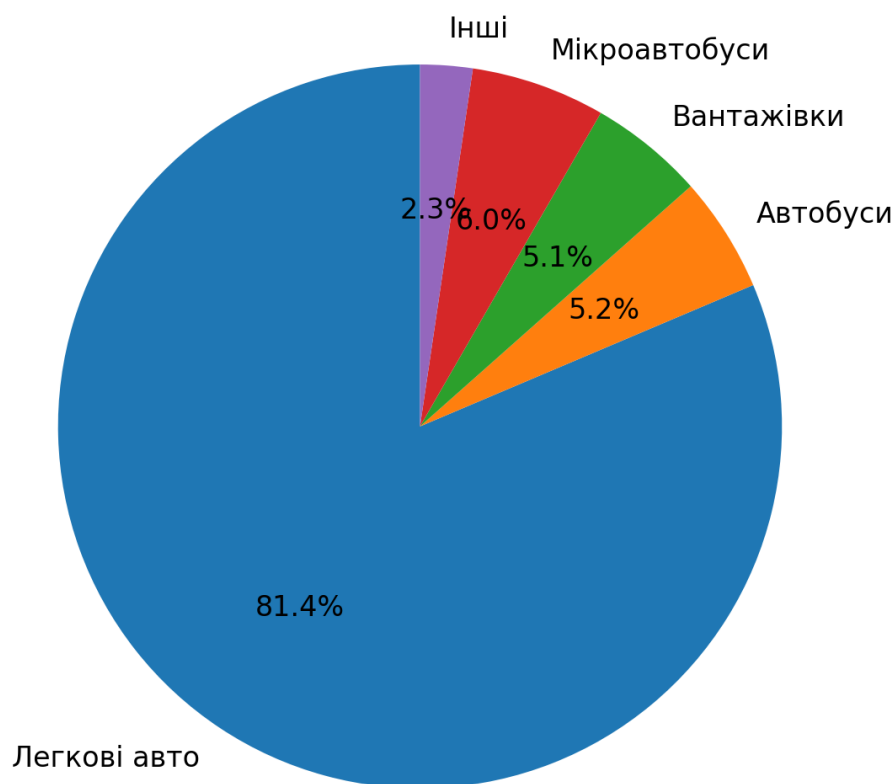


Рисунок 3.7 Загальна структура транспортного потоку за всіма ділянками

Кругова діаграма узагальнює структуру всього транспортного потоку: основну частку становлять легкові автомобілі.

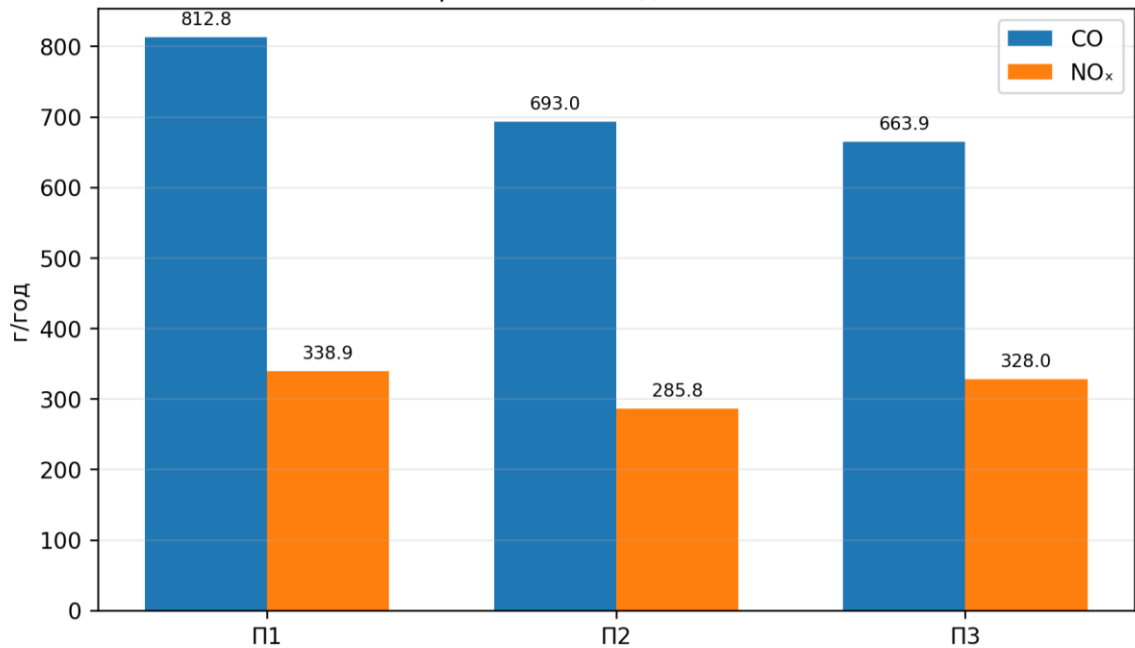


Рисунок 3.8. Порівняння викидів CO та NO_x на досліджуваних ділянках

Порівняння CO та NO_x показує, що за CO найбільш проблемною є П1, а за NO_x суттєве навантаження також характерне для П3.

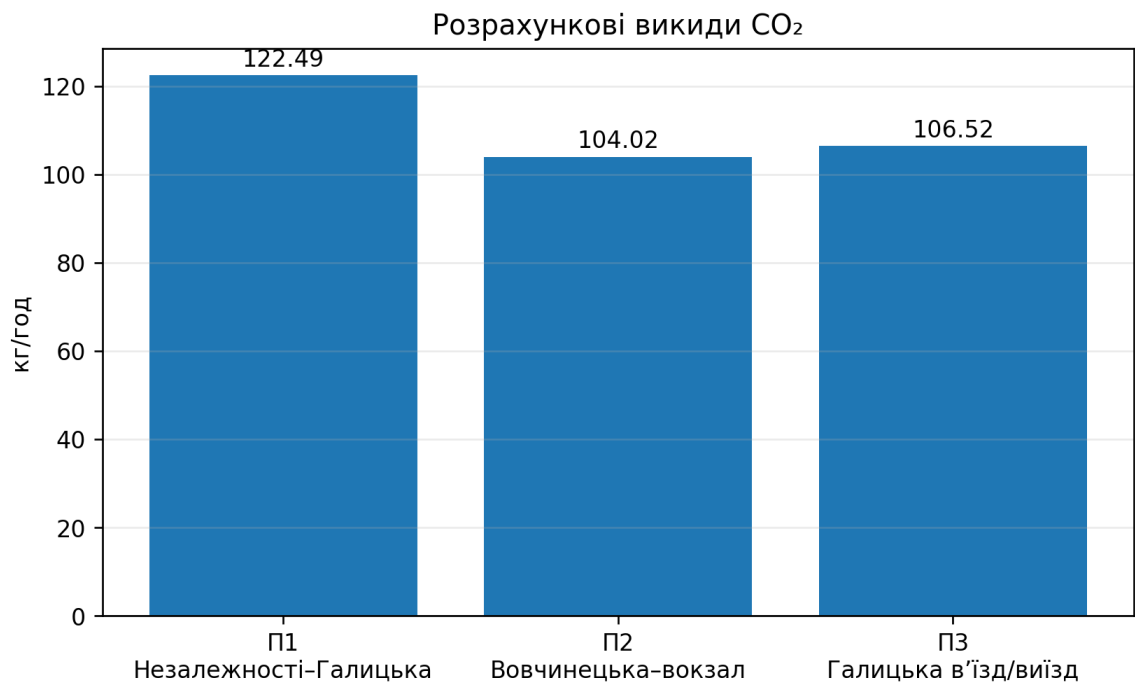


Рисунок 3.9 Розрахункові викиди CO₂ на досліджуваних ділянках

CO₂ відображає кліматичне навантаження автотранспорту. Найбільше значення має П1 - 122,49 кг/год.

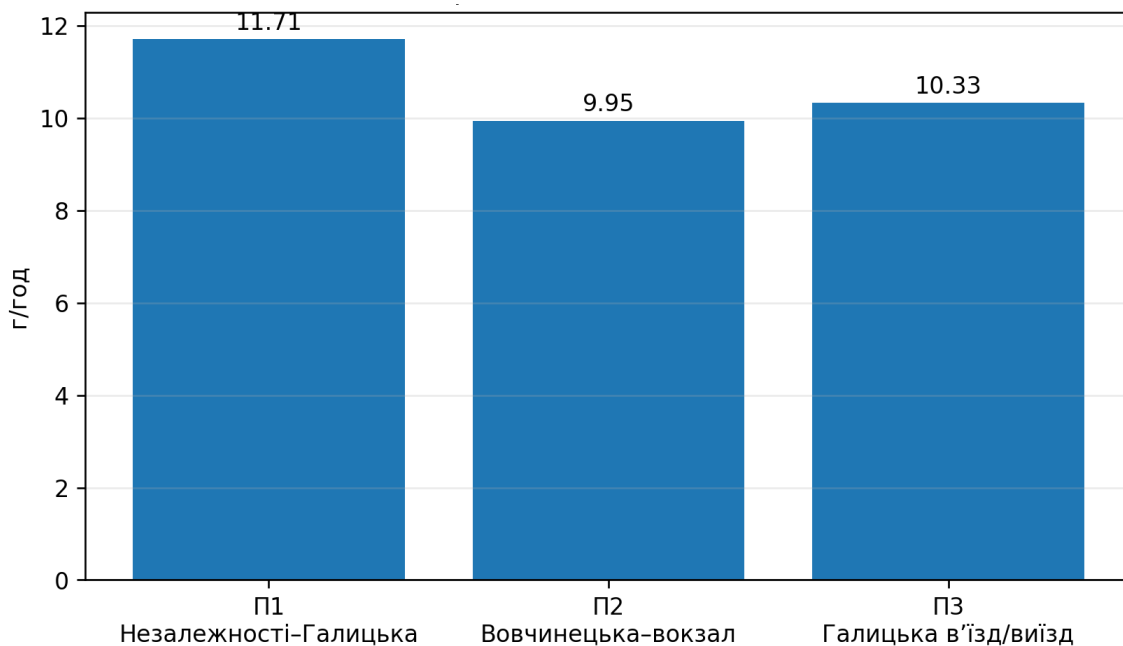


Рисунок 3.10 Орієнтовні викиди $PM_{2.5}$ на досліджуваних ділянках

$PM_{2.5}$ є важливим показником пилового забруднення. Підвищення на П3 пов'язане з часткою вантажного транспорту.

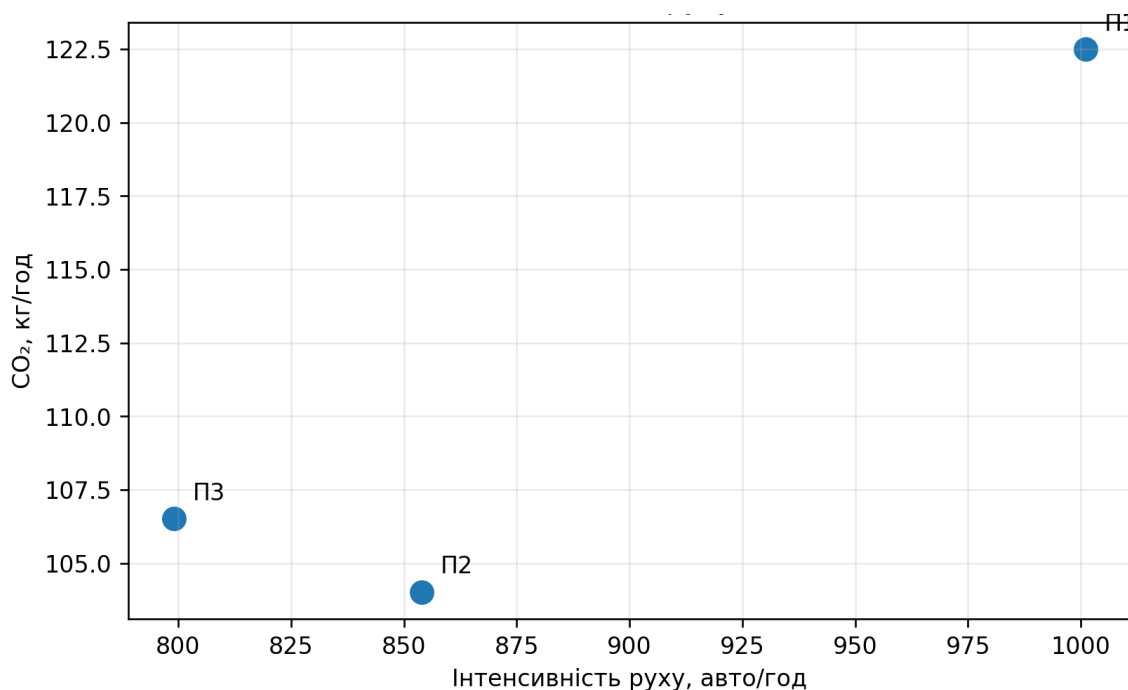


Рисунок 3.11 Зв'язок між інтенсивністю руху та викидами CO_2

Точкова діаграма демонструє загальну залежність: зі збільшенням інтенсивності руху зростають викиди CO_2 .

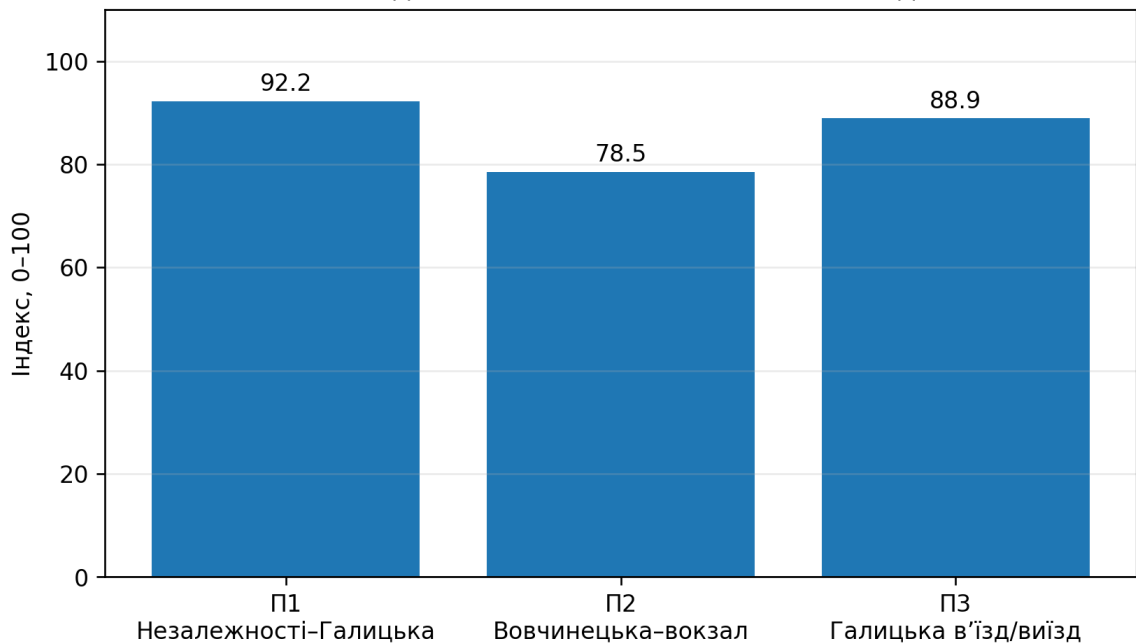


Рисунок 3.12 Умовний індекс екологічного навантаження ділянок
Умовний індекс узагальнює вплив інтенсивності руху, CO_2 , NO_x та частки вантажного транспорту.

Схема формування транспортних викидів у міському середовищі



CO , CO_2 , NO_x , $\text{PM}_{2.5}$, сажа, ЛОС та інші компоненти формують комплексне екологічне навантаження.

Рисунок 3.13 - Схема формування транспортних викидів у міському середовищі

Схема показує логіку формування викидів: транспортний потік спричиняє споживання пального, вихлопні й невихлопні викиди та ризики для населення.

Матриця дозволяє порівняти ділянки за основними критеріями

екологічного ризику.

Проведена графічна інтерпретація результатів підтверджує, що найвищий рівень загального транспортного навантаження характерний для ділянки П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька. Саме тут зафіксовано найбільшу інтенсивність руху, найвищі викиди CO_2 і CO , а також високі значення NO_x .

Ділянка П2 має середній рівень навантаження. Вона поступається П1 за інтенсивністю руху та розрахунковими викидами, однак залишається важливою через розташування поблизу залізничного вокзалу та активний рух громадського транспорту.

Ділянка П3 характеризується меншою загальною кількістю транспортних засобів, однак має підвищену частку вантажного транспорту. Через це викиди NO_x і $\text{PM}_{2.5}$ на цій ділянці залишаються високими. Отже, для екологічної оцінки автотранспортного навантаження необхідно враховувати не лише кількість автомобілів, а й структуру потоку, типи транспорту та умови руху.

Наведений комплект рисунків доцільно використати в експериментальній частині роботи для візуального підтвердження розрахункових результатів, порівняння ділянок і обґрунтування природоохоронних рекомендацій щодо скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій.

Проведене розрахункове оцінювання показало, що транспорт є важливим джерелом забруднення атмосферного повітря в м. Івано-Франківську. Найбільше транспортне навантаження зафіксовано на ділянці вул. Незалежності – вул. Галицька, де середня інтенсивність руху становить близько 1001 транспортного засобу за годину. Саме ця ділянка характеризується найвищими розрахунковими викидами CO_2 - 122,49 кг/год.

Ділянка вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста має меншу загальну інтенсивність руху, проте через більшу частку вантажного транспорту характеризується підвищеними викидами NO_x та $\text{PM}_{2.5}$. Це свідчить про те, що

екологічне навантаження залежить не лише від кількості транспортних засобів, а й від структури транспортного потоку.

Для зменшення викидів автотранспорту в м. Івано-Франківську доцільно рекомендувати:

- оптимізацію роботи світлофорів на центральних перехрестях;
- обмеження руху вантажного транспорту в центральній частині міста;
- розвиток громадського електротранспорту;
- створення умов для велосипедного та пішохідного руху;
- зменшення хаотичного паркування біля перехресть;
- озеленення вулиць із високим транспортним навантаженням.

Таким чином, найбільш проблемною з досліджених ділянок є вул. Незалежності – вул. Галицька, а найбільш небезпечною за впливом вантажного транспорту - вул. Галицька на в'їзді/виїзді з міста. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування природоохоронних заходів, спрямованих на зменшення викидів автотранспорту та покращення якості атмосферного повітря в Івано-Франківську.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАХОДИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ В МІСТАХ

4.1. Технічні технології зменшення викидів від транспортних засобів

Технічні технології зменшення викидів від транспортних засобів є одним із найважливіших напрямів скорочення забруднення атмосферного повітря в містах. Вони спрямовані на зниження кількості шкідливих речовин, що утворюються під час роботи двигуна, очищення відпрацьованих газів, підвищення ефективності використання пального та поступовий перехід до екологічно безпечніших видів транспорту. На відміну від організаційних заходів, які пов'язані переважно з регулюванням транспортних потоків, технічні технології безпосередньо впливають на сам транспортний засіб, його двигун, паливну систему та систему очищення викидів.

Основними технічними рішеннями, що застосовуються для зменшення викидів автотранспорту, є каталітичні нейтралізатори, сажові фільтри, системи рециркуляції відпрацьованих газів, системи очищення викидів дизельних двигунів, покращення якості пального, а також перехід на електромобілі, гібридний транспорт і транспорт на альтернативних видах палива.

Однією з найбільш поширених технологій очищення відпрацьованих газів бензинових автомобілів є каталітичний нейтралізатор. Це пристрій, який встановлюється у вихлопній системі транспортного засобу та забезпечує хімічне перетворення токсичних компонентів вихлопних газів на менш небезпечні речовини. Основне завдання каталітичного нейтралізатора полягає у зменшенні викидів оксиду вуглецю, вуглеводнів і оксидів азоту.

У процесі роботи каталітичного нейтралізатора оксид вуглецю окиснюється до діоксиду вуглецю, незгорілі вуглеводні перетворюються на вуглекислий газ і водяну пару, а оксиди азоту частково відновлюються до молекулярного азоту. Для перебігу цих реакцій використовуються каталізатори, зокрема платина, паладій і родій. Ефективність роботи

нейтралізатора залежить від технічного стану двигуна, температури вихлопних газів, якості пального та справності системи подачі паливно-повітряної суміші.

Важливо зазначити, що каталітичний нейтралізатор ефективно працює лише за умови справного двигуна та правильної експлуатації автомобіля. Якщо двигун працює з порушеннями, паливо згоряє неповністю або використовується неякісне паливо, ефективність очищення знижується. Також каталізатор може втрачати свої властивості внаслідок зношування, механічних пошкоджень або перегрівання. Тому регулярний технічний контроль транспортних засобів є необхідною умовою зменшення викидів.

Для дизельних транспортних засобів важливе значення мають сажові фільтри, або фільтри твердих частинок. Вони призначені для затримання дрібнодисперсних частинок, сажі та інших твердих компонентів, що утворюються під час згоряння дизельного пального. Особливо актуальним використання таких фільтрів є для міських автобусів, вантажівок, маршрутних таксі та спеціальної техніки, які працюють у межах міських територій і часто є джерелами твердих частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} .

Сажовий фільтр працює за принципом механічного затримання частинок у пористій структурі фільтрувального матеріалу. У процесі експлуатації фільтр поступово накопичує сажу, тому потребує періодичного очищення або регенерації. Регенерація може відбуватися автоматично за високої температури вихлопних газів або за допомогою спеціальних систем керування двигуном. Якщо сажовий фільтр несправний, засмічений або видалений із автомобіля, викиди твердих частинок значно зростають.

Сажові фільтри є особливо важливими для зменшення ризиків для здоров'я населення, оскільки дрібнодисперсні частинки мають здатність проникати глибоко в дихальну систему людини. У міських умовах, де транспорт рухається поруч із житловими будинками, школами, лікарнями та зупинками громадського транспорту, зменшення кількості сажі та твердих частинок має велике санітарно-екологічне значення.

Ще однією важливою технологією є система рециркуляції відпрацьованих газів, відома як EGR. Її основне призначення - зниження утворення оксидів азоту в двигуні. Оксиди азоту формуються за високих температур у камері згоряння, тому для зменшення їх утворення частина відпрацьованих газів повертається назад у впускну систему двигуна. Це знижує температуру згоряння паливно-повітряної суміші й відповідно зменшує кількість NO_x у вихлопних газах.

Системи EGR застосовуються як у бензинових, так і в дизельних двигунах. Їхня ефективність залежить від режиму роботи двигуна, справності клапана рециркуляції, чистоти каналів і якості пального. Недоліком цієї системи є можливе накопичення відкладень у впускному тракті та зниження ефективності роботи двигуна за відсутності належного обслуговування. Проте за правильної експлуатації EGR є дієвим способом зменшення викидів оксидів азоту.

Для сучасних дизельних автомобілів також застосовуються системи селективного каталітичного відновлення, або SCR. Вони призначені для зменшення викидів оксидів азоту за допомогою спеціального реагенту, який подається у вихлопну систему. У результаті хімічної реакції оксиди азоту перетворюються на азот і водяну пару. Такі системи є ефективними для автобусів, вантажних автомобілів та іншого дизельного транспорту, який має значні викиди NO_x .

Важливим напрямом зменшення викидів є покращення якості пального. Якість бензину, дизельного пального та газового пального безпосередньо впливає на повноту згоряння, кількість токсичних речовин у вихлопних газах і довговічність систем очищення. Пальне з низьким вмістом сірки сприяє зменшенню викидів діоксиду сірки та твердих частинок, а також забезпечує ефективнішу роботу каталітичних нейтралізаторів і сажових фільтрів.

Використання неякісного пального може призводити до збільшення викидів оксиду вуглецю, вуглеводнів, сажі та інших шкідливих речовин. Крім того, домішки в пальному можуть пошкоджувати паливну систему,

каталізатори й фільтри, що знижує екологічну ефективність транспортного засобу. Тому контроль якості пального є важливим елементом політики скорочення викидів автотранспорту.

Окремим напрямом є використання альтернативних видів пального, зокрема стисненого природного газу, скрапленого нафтового газу, біопалива та водню. Газове пальне зазвичай забезпечує менші викиди твердих частинок і сажі порівняно з дизельним паливом, хоча його екологічна ефективність залежить від типу двигуна, технічного стану транспортного засобу та умов експлуатації. Біопаливо може зменшувати залежність від викопних ресурсів, але його використання потребує оцінки повного життєвого циклу, включно з виробництвом сировини.

Найперспективнішим напрямом скорочення локального забруднення міського повітря є перехід на електромобілі та електричний громадський транспорт. Електромобілі не мають вихлопної труби, тому під час руху не викидають у міське повітря оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні, сажу та інші продукти згоряння пального. Це особливо важливо для центральних районів міст, густозабудованих вулиць, зон біля шкіл, лікарень, парків і громадських просторів.

Електричний транспорт має також переваги щодо зниження шумового навантаження, особливо на низьких швидкостях. Для міста особливо корисним є розвиток електробусів, тролейбусів, трамваїв та електромобілів службового або комунального призначення. Перехід громадського транспорту на електричну тягу може мати значний екологічний ефект, оскільки один електробус або тролейбус здатний замінити значну кількість поїздок приватними автомобілями.

Разом із тим електротранспорт не можна вважати абсолютно безвикидним у повному екологічному сенсі. Викиди можуть утворюватися на етапі виробництва електроенергії, виготовлення акумуляторів і утилізації батарей. Крім того, електромобілі, як і звичайні автомобілі, утворюють невихлопні викиди внаслідок зношування шин, гальмівних елементів і

дорожнього покриття. Тому найбільший екологічний ефект електротранспорт дає тоді, коли електроенергія виробляється з низьковуглецевих джерел, а транспортна система міста орієнтована не лише на заміну автомобілів, а й на зменшення загальної кількості поїздок приватним транспортом.

Проміжним рішенням між традиційними автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння та повністю електричним транспортом є гібридні автомобілі. Вони поєднують двигун внутрішнього згоряння та електродвигун. У міських умовах гібридний транспорт має переваги, оскільки під час руху з низькою швидкістю, зупинок і розгонів може частково використовувати електричну тягу, що зменшує споживання пального та викиди. Особливо ефективними є гібридні автобуси та легкові автомобілі в умовах частих зупинок, характерних для міського руху.

До технічних рішень, що сприяють скороченню викидів, також належать системи старт-стоп, які автоматично вимикають двигун під час короткочасної зупинки автомобіля, наприклад на світлофорі або в заторі, і знову запускають його під час початку руху. Це дозволяє зменшити витрати пального та викиди під час простою. У містах, де автомобілі часто зупиняються, така технологія може мати помітний екологічний ефект.

Важливим напрямом є також підвищення паливної ефективності транспортних засобів. Воно досягається завдяки вдосконаленню конструкції двигуна, зменшенню маси автомобіля, покращенню аеродинаміки, використанню ефективних трансмісій, правильному тиску в шинах і застосуванню енергоощадних технологій. Чим менше пального споживає транспортний засіб на одиницю пробігу, тим менше викидів утворюється під час його експлуатації.

Для узагальнення основні технічні технології зменшення викидів від транспортних засобів подані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1. Основні технічні технології зменшення викидів

Технологія	Основне призначення	Екологічний ефект
Каталітичний	Очищення вихлопних	Зменшення викидів CO,

нейтралізатор	газів бензинових двигунів	вуглеводнів і NO _x
Сажовий фільтр	Затримання твердих частинок у дизельних автомобілях	Скорочення викидів сажі та РМ
Система EGR	Рециркуляція частини відпрацьованих газів	Зменшення утворення оксидів азоту
Система SCR	Каталітичне відновлення NO _x у дизельних двигунах	Значне зниження викидів оксидів азоту
Якісне пальне	Забезпечення повнішого згоряння та захист систем очищення	Зменшення токсичності вихлопних газів
Газове пальне	Заміна бензину або дизелю на менш забруднювальне пальне	Зниження викидів сажі та твердих частинок
Гібридний транспорт	Поєднання ДВЗ та електродвигуна	Зменшення витрат пального в міському русі
Електромобілі	Використання електричної тяги	Відсутність вихлопних газів у місці експлуатації
Система старт-стоп	Вимкнення двигуна під час зупинок	Зменшення викидів у заторах і на світлофорах

Незважаючи на ефективність технічних технологій, вони мають певні обмеження. Каталітичні нейтралізатори, сажові фільтри та системи EGR потребують належного технічного обслуговування. Старі транспортні засоби можуть не мати сучасних систем очищення або мати їх у несправному стані. Електромобілі потребують розвитку зарядної інфраструктури та екологічно

відповідального поводження з акумуляторами. Гібридний транспорт зменшує, але не усуває повністю викиди від двигуна внутрішнього згоряння.

Тому технічні технології скорочення викидів мають застосовуватися комплексно. Найбільшого ефекту можна досягти за умови оновлення автопарку, розвитку електричного громадського транспорту, контролю технічного стану автомобілів, використання якісного пального та впровадження сучасних систем очищення вихлопних газів. У міських умовах особливо важливо спрямовувати такі заходи на громадський транспорт, комунальну техніку, вантажний транспорт і транспортні засоби, що експлуатуються у районах з високою щільністю населення.

Технічні технології зменшення викидів від транспортних засобів є важливим інструментом покращення якості атмосферного повітря в містах. До найбільш ефективних рішень належать каталітичні нейтралізатори, сажові фільтри, системи рециркуляції відпрацьованих газів, системи селективного каталітичного відновлення, використання якісного пального, перехід на гібридний та електричний транспорт. Їхнє впровадження дозволяє зменшити викиди оксиду вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів, сажі та твердих частинок. Водночас технічні заходи мають бути поєднані з належним технічним контролем, оновленням автопарку та розвитком екологічно безпечної міської мобільності.

4.2. Організаційні заходи зменшення транспортного навантаження

Організаційні заходи зменшення транспортного навантаження є важливою складовою скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій. На відміну від технічних технологій, які спрямовані на вдосконалення транспортного засобу, організаційні заходи стосуються управління транспортними потоками, планування дорожнього руху, розподілу пріоритетів між різними видами транспорту та зменшення надмірного використання приватних автомобілів.

У міських умовах значна частина транспортних викидів формується не лише через кількість автомобілів, а й через неефективну організацію руху. Часті зупинки, затори, тривала робота двигунів на холостому ходу, хаотичне паркування, перевантажені перехрестя та недостатній розвиток громадського транспорту призводять до збільшення витрат пального і, відповідно, до зростання обсягів викидів забруднювальних речовин. Тому оптимізація транспортної системи є одним із найбільш ефективних напрямів зменшення екологічного навантаження на атмосферне повітря.

Одним із ключових організаційних заходів є оптимізація схем дорожнього руху. Вона передбачає перегляд маршрутів руху транспорту, покращення роботи світлофорів, удосконалення розмітки, організацію одностороннього руху на вузьких вулицях, створення безпечних розворотів, ліквідацію конфліктних точок і підвищення пропускної здатності проблемних ділянок. Метою таких заходів є забезпечення більш рівномірного руху транспорту без частих зупинок і різких розгонів.

Екологічний ефект оптимізації дорожнього руху полягає в тому, що транспортні засоби менше часу перебувають у заторах і працюють у режимі холостого ходу. Рівномірний рух із помірною швидкістю сприяє зменшенню споживання пального, зниженню викидів оксиду вуглецю, оксидів азоту, вуглеводнів, твердих частинок і діоксиду вуглецю. Особливо важливо оптимізувати рух на великих перехрестях, біля вокзалів, ринків, торговельних центрів, шкіл, лікарень і центральних вулиць.

Важливим напрямом є зменшення заторів. Затори є одним із головних чинників зростання транспортних викидів у містах, оскільки автомобілі під час заторів працюють неефективно: часто зупиняються, рушають, гальмують і тривалий час працюють із увімкненим двигуном. У таких умовах підвищуються викиди оксиду вуглецю, вуглеводнів, оксидів азоту, сажі та CO₂. Крім того, затори погіршують якість життя населення, збільшують шум, стрес, втрати часу та економічні витрати.

Для зменшення заторів застосовувалися такі заходи табл. 4.2

Таблиця 4.2. Заходи для зменшення заторів

Захід	Очікуваний результат
Налаштування світлофорних циклів	Зменшення часу очікування на перехрестях
Впровадження адаптивного світлофорного регулювання	Автоматичне коригування руху залежно від інтенсивності потоку
Організація одностороннього руху	Зниження конфліктності та збільшення пропускної здатності вулиць
Заборона хаотичного паркування	Звільнення смуг руху та зменшення затримок
Обмеження вантажного транспорту в години пік	Зменшення перевантаження доріг
Покращення інформування водіїв	Перерозподіл потоків і вибір альтернативних маршрутів

Одним із сучасних підходів до управління транспортними потоками є використання інтелектуальних транспортних систем. Вони включають автоматизоване керування світлофорами, відеомоніторинг дорожньої ситуації, інформаційні табло, датчики інтенсивності руху, системи контролю паркування та мобільні сервіси для водіїв. Такі системи дозволяють оперативно реагувати на затори, аварії, ремонтні роботи та змінювати організацію руху залежно від фактичної ситуації.

Особливе значення для зменшення транспортного навантаження має розвиток громадського транспорту. Якщо громадський транспорт є зручним, регулярним, швидким і доступним, частина населення відмовляється від щоденного використання приватного автомобіля. Це дозволяє зменшити кількість автомобілів на дорогах, скоротити затори, знизити потребу в паркувальних місцях і зменшити загальний обсяг викидів.

Одним із ефективних організаційних заходів є створення виділених смуг

для громадського транспорту. Такі смуги дозволяють автобусам, тролейбусам або електробусам рухатися швидше й регулярніше, незалежно від загальної завантаженості дороги. Завдяки цьому громадський транспорт стає конкурентоспроможнішим порівняно з приватним автомобілем, а пасажери отримують можливість швидше й передбачуваніше пересуватися містом.

Екологічна перевага виділених смуг полягає в тому, що один автобус або тролейбус може перевозити значну кількість пасажирів, замінюючи десятки приватних автомобілів. Зменшення кількості автомобілів у транспортному потоці сприяє скороченню викидів, зменшенню заторів і покращенню якості атмосферного повітря. Особливо доцільно створювати такі смуги на магістральних вулицях, які з'єднують житлові райони з центром міста, вокзалами, університетами, лікарнями та великими місцями праці.

Водночас ефективність виділених смуг залежить від належного контролю за їх використанням. Якщо смуги для громадського транспорту займаються приватними автомобілями, таксі або припаркованим транспортом, їхня ефективність різко знижується. Тому необхідним є дорожнє маркування, встановлення відповідних знаків, фото- та відеофіксація порушень, а також інформаційна робота з водіями.

Важливим напрямом є обмеження руху в центральних частинах міста. Центральні райони часто мають щільну забудову, вузькі вулиці, високу концентрацію адміністративних, культурних, торговельних і громадських об'єктів. Через це вони приваблюють значну кількість поїздок приватним транспортом, що призводить до заторів, шуму, забруднення повітря та дефіциту паркувальних місць.

Обмеження руху в центральних частинах міста може здійснюватися різними способами: створення пішохідних зон, зон обмеженого руху, обмеження в'їзду вантажного транспорту, запровадження платного паркування, організація перехоплювальних паркінгів на околицях, розвиток громадського транспорту та велосипедної інфраструктури. Такі заходи не обов'язково означають повну заборону автомобілів, але передбачають

зменшення їхньої кількості та пріоритет для пішоходів, громадського транспорту й екологічних видів мобільності. Для центральних районів міста доцільними є такі організаційні рішення табл. 4.3.

Таблиця 4.3 Організаційні рішення

Організаційний захід	Екологічний ефект
Пішохідні зони	Повне усунення локальних транспортних викидів на окремих вулицях
Зони обмеженого руху	Зменшення кількості автомобілів у центрі
Обмеження вантажного транспорту	Скорочення викидів NO _x , сажі та твердих частинок
Платне паркування	Зменшення тривалого перебування приватних автомобілів у центрі
Перехоплювальні паркінги	Перенесення частини автомобільного руху за межі центру
Пріоритет громадського транспорту	Зменшення потреби у приватних автомобілях

Окремим важливим заходом є упорядкування паркування. Хаотичне паркування є не лише містобудівною, а й екологічною проблемою. Автомобілі, припарковані на узбіччях, тротуарах або поблизу перехресть, зменшують пропускну здатність вулиць, ускладнюють рух громадського транспорту, створюють небезпеку для пішоходів і сприяють утворенню заторів. Крім того, паркування на газонах призводить до ущільнення ґрунту, пошкодження рослинності та забруднення території нафтопродуктами.

Ефективна паркувальна політика має включати визначення дозволених зон паркування, заборону стоянки в екологічно та транспортно чутливих місцях, розвиток платного паркування, створення паркінгів біля транспортних вузлів і контроль за порушеннями. У центральних районах доцільно обмежувати тривале паркування приватних автомобілів, надаючи перевагу громадському транспорту, пішоходам і велосипедистам.

Важливим організаційним рішенням є обмеження руху вантажного транспорту в центральних і житлових районах. Вантажні автомобілі мають більші габарити, вищі витрати пального та, як правило, більші питомі викиди порівняно з легковими автомобілями. Вони також створюють шум, вібрації та підвищене навантаження на дорожнє покриття. Тому доцільно встановлювати часові обмеження для вантажного транспорту, визначати спеціальні маршрути для доставки товарів, організовувати логістичні зони та стимулювати використання менш забруднювального транспорту для міської доставки.

Ще одним перспективним заходом є створення зон спокійного руху в житлових районах. У таких зонах швидкість транспорту обмежується, перевага надається пішоходам і велосипедистам, зменшується транзитний рух і підвищується безпека мешканців. Хоча зниження швидкості саме по собі не завжди прямо зменшує всі види викидів, воно сприяє зменшенню транспортного потоку, підвищує безпеку та знижує шумове навантаження. Такі зони особливо доцільні біля шкіл, дитячих садків, лікарень, парків і житлових кварталів. Організаційні заходи також мають передбачати перерозподіл транспортних пріоритетів. У традиційній моделі міського планування значна увага приділялася пропускній здатності доріг для автомобілів. Однак сучасний підхід до сталої мобільності передбачає пріоритет для пішоходів, велосипедистів, громадського транспорту та людей з обмеженою мобільністю. Такий підхід дозволяє зменшити залежність міста від приватних автомобілів і, відповідно, знизити рівень транспортних викидів.

Для узагальнення основні організаційні заходи зменшення транспортного навантаження можна подати в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 Основні організаційні заходи зменшення транспортного навантаження

Захід	Механізм дії	Очікуваний екологічний результат
Оптимізація схем дорожнього руху	Покращення розподілу транспортних потоків	Зменшення заторів і викидів від холостого ходу

Адаптивне світлофорне регулювання	Налаштування світлофорів відповідно до потоку	Скорочення часу очікування на перехрестях
Виділені смуги для громадського транспорту	Пріоритет автобусів, тролейбусів, електробусів	Зростання привабливості громадського транспорту
Обмеження руху в центрі	Зменшення кількості приватних авто	Поліпшення якості повітря в центральних районах
Упорядкування паркування	Звільнення проїзної частини та тротуарів	Зменшення заторів і пошкодження зелених зон
Обмеження вантажного транспорту	Виведення важкого транспорту з житлових районів	Зменшення шуму, пилу, NO _x і сажі
Перехоплювальні паркінги	Пересадка з авто на громадський транспорт	Зниження кількості авто в центрі
Зони спокійного руху	Зменшення транзитного руху в житлових кварталах	Підвищення безпеки та зменшення локального навантаження

Організаційні заходи є ефективними лише за умови комплексного впровадження. Наприклад, обмеження руху в центрі міста буде малоефективним, якщо не забезпечити зручний громадський транспорт, перехоплювальні паркінги та безпечні пішохідні маршрути. Виділені смуги для громадського транспорту не дадуть очікуваного результату без контролю за їх використанням. Оптимізація світлофорів не вирішить проблему, якщо вулиці заблоковані хаотично припаркованими автомобілями.

Тому організаційне управління транспортним навантаженням має базуватися на системному підході. Він передбачає поєднання транспортного планування, екологічного аналізу, містобудівних рішень, громадської участі

та контролю за виконанням прийнятих заходів. Важливо, щоб рішення щодо організації руху враховували не лише швидкість переміщення автомобілів, а й вплив на якість атмосферного повітря, безпеку пішоходів, доступність громадського транспорту та комфорт міського середовища.

Особливо актуальним є впровадження організаційних заходів у зонах підвищеного екологічного ризику: біля шкіл, лікарень, житлових кварталів, парків, громадських просторів і центральних вулиць. У таких місцях доцільно знижувати інтенсивність руху, обмежувати транзитний транспорт, впорядковувати паркування, покращувати пішохідну інфраструктуру та збільшувати частку громадського транспорту. Таким чином, організаційні заходи зменшення транспортного навантаження є одним із найважливіших інструментів скорочення викидів автотранспорту в містах. Вони дозволяють зменшити затори, скоротити час роботи двигунів на холостому ходу, підвищити ефективність громадського транспорту, зменшити кількість приватних автомобілів у центральних районах і поліпшити якість міського середовища.

Організаційні заходи зменшення транспортного навантаження спрямовані на раціональне управління транспортними потоками та зменшення надмірної залежності міста від приватних автомобілів. До найбільш ефективних заходів належать оптимізація схем дорожнього руху, адаптивне світлофорне регулювання, зменшення заторів, створення виділених смуг для громадського транспорту, упорядкування паркування, обмеження руху вантажного транспорту та зменшення автомобільного навантаження в центральних частинах міста. Реалізація таких заходів дозволяє скоротити викиди забруднювальних речовин, зменшити шумове навантаження, підвищити безпеку руху та покращити якість життя населення.

4.3. Розвиток екологічного громадського транспорту

Розвиток екологічного громадського транспорту є одним із

найефективніших напрямів скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій. Саме громадський транспорт здатний перевозити велику кількість пасажирів одночасно, зменшуючи потребу населення у щоденному використанні приватних автомобілів. Це має важливе екологічне значення, оскільки зменшення кількості приватного транспорту на дорогах сприяє скороченню викидів забруднювальних речовин, зниженню рівня шуму, зменшенню заторів і покращенню якості атмосферного повітря. У сучасних умовах міста потребують переходу від традиційної автомобілеорієнтованої моделі розвитку до моделі сталої міської мобільності. Такий підхід передбачає пріоритет громадського транспорту, пішохідного руху, велосипедної інфраструктури та екологічно безпечних видів пересування. Громадський транспорт у цій системі відіграє ключову роль, оскільки забезпечує масове перевезення населення з меншим екологічним навантаженням на одиницю пасажирів порівняно з приватними автомобілями.

До основних видів екологічного громадського транспорту належать **електробуси, тролейбуси, трамваї**, а також інші транспортні засоби з низьким або нульовим рівнем локальних викидів. Їхня перевага полягає в тому, що під час руху вони не створюють або істотно зменшують викиди оксиду вуглецю, оксидів азоту, сажі, вуглеводнів і твердих частинок у місці експлуатації. Це особливо важливо для центральних районів міст, житлових кварталів, територій біля шкіл, лікарень, парків і громадських просторів.

Електробуси є одним із перспективних напрямів модернізації міського громадського транспорту. Вони працюють на електричній тязі, не мають вихлопної труби та не викидають забруднювальні речовини безпосередньо під час руху в місті. Електробуси можуть замінювати дизельні автобуси на маршрутах із високим пасажиропотоком, особливо в районах, де необхідно зменшити локальне забруднення повітря. Крім екологічних переваг, електробуси зазвичай мають нижчий рівень шуму, що покращує акустичний комфорт міського середовища.

Водночас впровадження електробусів потребує розвитку відповідної

інфраструктури. Йдеться про зарядні станції, депо для технічного обслуговування, підготовку персоналу, планування маршрутів з урахуванням запасу ходу та часу заряджання. Ефективність електробусів значною мірою залежить від організації експлуатації: правильного вибору маршрутів, режиму заряджання, температурних умов, пасажирського навантаження та стану акумуляторних батарей.

Тролейбуси є традиційним і водночас екологічно доцільним видом міського транспорту. Вони живляться від контактної мережі й не створюють вихлопних газів у місці руху. Для міст, які вже мають тролейбусну інфраструктуру, модернізація цього виду транспорту може бути економічно та екологічно вигідним рішенням. Сучасні тролейбуси можуть бути обладнані автономним ходом, що дозволяє їм рухатися певну відстань без контактної мережі. Це розширює можливості маршрутної мережі та зменшує потребу в будівництві нових ліній на всій довжині маршруту. Перевагами тролейбусів є відсутність локальних вихлопних викидів, відносно висока енергоефективність, менший рівень шуму порівняно з дизельними автобусами та можливість використання на завантажених міських маршрутах. Водночас їхній розвиток потребує підтримання контактної мережі, тягових підстанцій, регулярного оновлення рухомого складу та належного планування маршрутів.

Трамваї є одним із найбільш екологічно ефективних видів міського громадського транспорту, особливо для перевезення великих пасажиропотоків. Вони працюють на електричній тязі, мають високу провізну здатність і можуть забезпечувати стабільний рух на відокремлених коліях. За умови правильної організації трамвайний транспорт здатний суттєво зменшити кількість приватних автомобілів на дорогах і знизити транспортне навантаження в центральних районах міста.

Екологічні переваги трамвая полягають у відсутності вихлопних газів на маршруті, великій пасажиромісткості, довговічності інфраструктури та можливості інтеграції з пішохідними зонами й пересадковими вузлами. Особливо ефективними є сучасні низькопідлогові трамваї, які забезпечують

доступність для людей з інвалідністю, людей похилого віку, батьків із дитячими візками та інших маломобільних груп населення. Разом із тим розвиток трамвайного транспорту потребує значних інвестицій у колійну інфраструктуру, енергопостачання, депо, зупинки та рухомий склад. Тому трамвай найбільш доцільно розвивати на маршрутах із високим і стабільним пасажиропотоком, де він може замінити значну кількість автобусів і приватних автомобілів. Важливою умовою зниження транспортних викидів є модернізація наявного громадського транспорту. У багатьох містах значну частину перевезень виконують автобуси та маршрутні таксі, частина з яких може бути технічно застарілою, енергоємною та екологічно небезпечною. Старі дизельні транспортні засоби часто є джерелами оксидів азоту, сажі, твердих частинок і неприємних запахів. Тому оновлення автобусного парку є необхідним напрямом екологізації міського транспорту.

Таблиця 4.5 Модернізація громадського транспорту

Напрямок модернізації	Екологічне значення
Заміна старих дизельних автобусів	Зменшення викидів NO _x , сажі та РМ
Впровадження електробусів	Усунення локальних вихлопних викидів
Оновлення тролейбусів і трамваїв	Підвищення енергоефективності та комфорту
Встановлення сажових фільтрів	Зменшення твердих частинок від дизельного транспорту
Перехід на транспорт із нижчими викидами	Скорочення загального екологічного навантаження
Покращення технічного обслуговування	Запобігання надмірним викидам через несправності

Окрім технічного оновлення, велике значення має підвищення доступності та зручності громадського транспорту для населення. Навіть екологічний транспорт не дасть очікуваного результату, якщо ним буде

незручно користуватися. Для того щоб люди частіше обирали громадський транспорт замість приватного автомобіля, він має бути регулярним, безпечним, комфортним, швидким і фінансово доступним.

Доступність громадського транспорту означає наявність зручних маршрутів, достатньої кількості зупинок, можливість користування транспортом для людей з інвалідністю та інших маломобільних груп населення. Важливими є низькопідлогові транспортні засоби, зручні посадкові платформи, інформаційні табло, зрозуміла навігація, безбар'єрні переходи та інтеграція різних видів транспорту в єдину систему.

Таблиця 4.6 Зручність громадського транспорту

Чинник	Значення для пасажирів
Регулярність руху	Зменшує час очікування
Передбачуваний графік	Дозволяє планувати поїздки
Комфорт у салоні	Підвищує привабливість транспорту
Безбар'єрність	Забезпечує доступність для всіх груп населення
Єдиний квиток	Полегшує пересадки між видами транспорту
Інформаційні сервіси	Дають змогу відстежувати рух транспорту
Безпека	Формує довіру до громадського транспорту

Одним із важливих рішень є створення єдиної інтегрованої транспортної системи, у якій автобуси, тролейбуси, трамваї, електробуси, велосипедна інфраструктура та пішохідні маршрути працюють як взаємопов'язані елементи. Це передбачає зручні пересадки, узгоджені графіки руху, єдину систему оплати, транспортні хаби та перехоплювальні паркінги на околицях міста. Такий підхід дозволяє зменшити кількість поїздок приватними автомобілями до центральних районів.

Особливе значення мають виділені смуги для громадського транспорту, оскільки вони підвищують швидкість і надійність перевезень. Якщо громадський транспорт рухається швидше, ніж приватні автомобілі в заторах, він стає більш привабливим для населення. Це сприяє зменшенню кількості

автомобілів на дорогах і, відповідно, скороченню викидів. Виділені смуги особливо доцільні на магістральних вулицях із високим пасажиропотоком.

Розвиток екологічного громадського транспорту також має соціальне значення. Він забезпечує мобільність для людей, які не мають власного автомобіля, зменшує транспортну нерівність, покращує доступ до освіти, роботи, медичних послуг і громадських просторів. Отже, екологічний громадський транспорт сприяє не лише охороні довкілля, а й підвищенню якості життя населення.

З екологічної точки зору найбільший ефект досягається тоді, коли розвиток громадського транспорту поєднується з обмеженням надмірного використання приватних автомобілів. Якщо місто лише закуповує новий транспорт, але не змінює пріоритети дорожнього руху, не впорядковує паркування та не створює зручні умови для пасажирів, ефект може бути обмеженим. Тому розвиток громадського транспорту має супроводжуватися комплексною політикою сталої мобільності.

Таблиця 4.6 Основні заходи розвитку екологічного громадського транспорту

Захід	Очікуваний результат
Закупівля електробусів	Зменшення локальних вихлопних викидів
Оновлення тролейбусного парку	Підвищення надійності та енергоефективності перевезень
Розвиток трамвайної мережі	Збільшення провізної здатності та зменшення автомобільного руху
Створення виділених смуг	Підвищення швидкості громадського транспорту
Впровадження єдиного квитка	Зручність пересадок і привабливість системи
Облаштування доступних зупинок	Підвищення інклюзивності транспорту
Інформаційні табло та	Зменшення невизначеності для пасажирів

мобільні сервіси	
Перехоплювальні паркінги	Пересадка з приватного авто на громадський транспорт
Модернізація депо та зарядної інфраструктури	Забезпечення стабільної роботи електротранспорту

Під час планування розвитку громадського транспорту важливо враховувати особливості конкретного міста: чисельність населення, щільність забудови, пасажиропотоки, наявну транспортну інфраструктуру, фінансові можливості громади та екологічні проблеми. Наприклад, для міста з наявною тролейбусною мережею доцільним може бути оновлення тролейбусів і впровадження моделей з автономним ходом. Для великих міст із високими пасажиропотоками ефективним може бути розвиток трамвайного транспорту. Для середніх міст перспективним рішенням можуть бути електробуси або автобуси з низьким рівнем викидів.

Важливим показником ефективності розвитку громадського транспорту є зміна транспортної поведінки населення. Якщо після модернізації системи зростає частка поїздок громадським транспортом і зменшується частка поїздок приватними автомобілями, це свідчить про позитивний екологічний ефект. У результаті зменшується навантаження на дороги, знижуються викиди, покращується якість повітря та підвищується комфорт міського середовища.

Отже, розвиток екологічного громадського транспорту є стратегічним напрямом скорочення викидів автотранспорту в містах. Він повинен включати не лише закупівлю електробусів, тролейбусів і трамваїв, а й модернізацію всієї системи перевезень, підвищення її доступності, зручності, регулярності та привабливості для населення. Розвиток екологічного громадського транспорту є одним із найважливіших заходів зменшення транспортного навантаження та скорочення викидів у міському середовищі. Електробуси, тролейбуси та трамваї мають значні переваги завдяки відсутності локальних вихлопних викидів, нижчому рівню шуму та здатності перевозити велику

кількість пасажирів. Модернізація громадського транспорту, створення виділених смуг, впровадження єдиної системи оплати, підвищення доступності зупинок і комфорту перевезень сприяють зменшенню використання приватних автомобілів. Комплексний розвиток екологічного громадського транспорту дозволяє покращити якість атмосферного повітря, знизити рівень заторів і підвищити якість життя населення міських територій.

4.4. Розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури

Розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури є важливим напрямом скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій. На відміну від автомобільного транспорту, піші та велосипедні пересування не створюють вихлопних газів, не потребують значних площ для паркування, сприяють зменшенню заторів і покращують якість міського середовища. Тому формування безпечної, зручної та доступної інфраструктури для пішоходів і велосипедистів є одним із ключових елементів сталої міської мобільності.

У сучасному місті значна частина поїздок здійснюється на короткі відстані: до місця роботи, навчання, магазинів, зупинок громадського транспорту, парків, адміністративних установ і закладів обслуговування. Часто такі переміщення можна виконувати пішки або велосипедом, однак через відсутність безпечної інфраструктури населення змушене використовувати приватні автомобілі навіть для коротких поїздок. Це призводить до збільшення транспортного навантаження, заторів, викидів забруднювальних речовин і потреби у додаткових паркувальних місцях.

Одним із основних елементів велосипедної інфраструктури є велодоріжки. Вони забезпечують безпечний і зручний рух велосипедистів, відокремлюючи їх від автомобільного транспорту та пішохідних потоків. Наявність велодоріжок підвищує привабливість велосипеда як щоденного засобу пересування, особливо на відстанях до 3–5 км. Для міських територій це має важливе екологічне значення, оскільки частина коротких

автомобільних поїздок може бути замінена велосипедними.

Велодоріжки мають бути не окремими фрагментами, а частиною цілісної міської мережі. Якщо велосипедна інфраструктура переривається на перехрестях, біля зупинок громадського транспорту або на складних ділянках дороги, її ефективність знижується. Тому під час планування веломережі важливо забезпечити безперервність маршрутів, безпечні перетини з автомобільними дорогами, зрозумілу навігацію, якісне покриття та освітлення.

Таблиця 4.7 Основних вимоги до велосипедної інфраструктури

Елемент велосипедної інфраструктури	Значення для сталої мобільності
Велодоріжки	Забезпечують безпечний рух велосипедистів
Велосмуги	Дозволяють організувати рух велосипедів на проїжджій частині
Велопарковки	Створюють умови для зручного залишення велосипеда
Веломаршрути	Поєднують житлові райони з центром, навчальними закладами та громадським транспортом
Безпечні перехрестя	Зменшують ризики дорожньо-транспортних пригод
Освітлення та навігація	Підвищують комфорт і безпеку пересування

Важливим доповненням до велодоріжок є **велопарковки**. Їх доцільно розміщувати біля навчальних закладів, адміністративних будівель, торговельних центрів, парків, лікарень, зупинок громадського транспорту та житлових комплексів. Відсутність безпечних місць для зберігання велосипедів знижує мотивацію населення використовувати велосипед для щоденних поїздок. Тому велопарковки мають бути зручними, добре освітленими, розміщеними в доступних місцях і, за можливості, захищеними від опадів.

Окрім велосипедної інфраструктури, важливе значення має розвиток **пішохідної інфраструктури**. Пішохідний рух є найпростішим, найдоступнішим і найбільш екологічно безпечним способом пересування. Він не створює викидів, шуму та не потребує пального. Водночас якість пішохідної інфраструктури безпосередньо впливає на те, чи готові люди частіше пересуватися пішки замість використання автомобіля.

До основних елементів пішохідної інфраструктури належать тротуари, пішохідні переходи, пішохідні зони, площі, вулиці зі зниженим автомобільним рухом, зручні підходи до зупинок громадського транспорту, безбар'єрні маршрути, освітлення, озеленення та місця для відпочинку. Усі ці елементи мають формувати безпечне й комфортне середовище для людей різного віку та фізичних можливостей.

Особливе значення мають **пішохідні зони**. Їх створення в центральних частинах міст, біля історичних об'єктів, парків, навчальних закладів і громадських просторів дозволяє зменшити кількість автомобілів у найбільш чутливих міських районах. Пішохідні зони сприяють покращенню якості повітря, зниженню шуму, розвитку малого бізнесу, туризму та підвищенню привабливості міського простору.

Екологічний ефект пішохідних зон полягає в тому, що на таких територіях усуваються або значно обмежуються локальні транспортні викиди. Крім того, пішохідні простори часто поєднуються з озелененням, встановленням лавок, велопарковок, питних фонтанчиків, освітлення та елементів благоустрою. Це робить місто більш комфортним для мешканців і зменшує залежність від приватного автомобіля.

Важливим елементом безпечної міської мобільності є **безпечні пішохідні переходи**. Недостатньо лише нанести дорожню розмітку; перехід має бути добре видимим, освітленим, зрозумілим для водіїв і зручним для пішоходів. У місцях інтенсивного руху доцільно застосовувати острівці безпеки, підвищені переходи, світлофорне регулювання, тактильну плитку для людей із порушеннями зору та пониження бордюрів для маломобільних груп

населення.

Особливої уваги потребують переходи біля шкіл, дитячих садків, лікарень, зупинок громадського транспорту, парків і житлових кварталів. У цих місцях необхідно створювати умови для безпечного пересування дітей, людей похилого віку, осіб з інвалідністю та інших вразливих груп населення. Безпечна пішохідна інфраструктура не лише зменшує ризик аварій, а й стимулює населення частіше обирати піші маршрути.

Розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури є частиною ширшого поняття **міської мобільності**. Міська мобільність - це система організації пересування людей у місті з урахуванням безпеки, доступності, екологічності, економічної ефективності та комфорту. У межах сталої мобільності пріоритет надається не кількості автомобілів, а зручності пересування людей. Це означає, що міський простір має бути організований так, щоб пішоходи, велосипедисти, користувачі громадського транспорту та маломобільні групи населення мали безпечні й рівні можливості для пересування.

Одним із головних завдань сталої мобільності є **зменшення залежності населення від приватного автотранспорту**. Надмірна автомобілізація призводить до заторів, забруднення повітря, шуму, дефіциту паркувальних місць, зменшення площі зелених зон і погіршення якості міського середовища. Якщо ж місто створює зручні умови для пішого руху, велосипедів і громадського транспорту, частина населення добровільно відмовляється від щоденного використання автомобіля.

Для зменшення залежності від приватного автотранспорту важливо, щоб альтернативні способи пересування були не лише екологічними, а й практичними. Людина обирає піший маршрут або велосипед тоді, коли це безпечно, швидко, зручно та передбачувано. Тому велодоріжки й пішохідні маршрути мають з'єднувати житлові райони з основними місцями тяжіння: центром міста, закладами освіти, робочими зонами, громадським транспортом, парками та торговельними об'єктами.

Важливим напрямом є поєднання велосипедної інфраструктури з громадським транспортом. Наприклад, велопарковки біля зупинок, вокзалів і транспортних вузлів дозволяють мешканцям комбінувати велосипед і громадський транспорт в одній поїздки. Такий підхід зменшує потребу в автомобілі для переміщення на середні відстані та підвищує гнучкість міської мобільності.

Таблиця 4.8 Заходи для розвитку пішохідної та велосипедної інфраструктури

Захід	Очікуваний результат
Будівництво велодоріжок	Збільшення частки велосипедних поїздок
Облаштування велопарковок	Підвищення зручності користування велосипедом
Створення пішохідних зон	Зменшення автомобільного руху в центральних районах
Реконструкція тротуарів	Покращення умов для пішоходів
Безпечні переходи	Зменшення ризиків для пішоходів
Озеленення вулиць	Покращення мікроклімату та комфорту руху
Безбар'єрне середовище	Доступність для людей з інвалідністю, літніх людей і батьків з дитячими візками
Інтеграція з громадським транспортом	Зручні пересадки та зменшення потреби в автомобілі

Розвиток такої інфраструктури має також позитивний вплив на здоров'я населення. Піші та велосипедні пересування сприяють підвищенню фізичної активності, зменшенню стресу, покращенню загального самопочуття та формуванню більш здорового способу життя. Таким чином, ці заходи мають не лише екологічне, а й соціальне та медико-профілактичне значення.

Водночас важливо враховувати, що розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури потребує системного планування. Недостатньо створити окрему велодоріжку або одну пішохідну вулицю. Необхідно формувати

мережу маршрутів, яка буде логічною, безперервною та пов'язаною з іншими видами транспорту. Також потрібні інформаційні кампанії, які пояснюватимуть переваги екологічної мобільності, правила безпеки та культуру взаємодії між водіями, велосипедистами й пішоходами.

Таблиця 4.9 Зони в яких доцільно розвивати пішохідну та велосипедну інфраструктуру

Територія	Доцільні заходи
Центр міста	Пішохідні зони, обмеження руху авто, велопарковки
Житлові райони	Зони спокійного руху, безпечні тротуари, веломаршрути
Території біля шкіл	Безпечні переходи, зниження швидкості, обмеження паркування
Парки та рекреаційні зони	Пішохідні маршрути, велодоріжки, озеленення
Зупинки громадського транспорту	Зручні підходи, велопарковки, безбар'єрність
Університети та громадські об'єкти	Велопарковки, освітлені тротуари, безпечні переходи

Екологічний ефект від розвитку велосипедної та пішохідної інфраструктури проявляється поступово. Спочатку створюються умови для альтернативного пересування, далі зростає кількість людей, які користуються велосипедом або ходять пішки, після чого зменшується частка коротких поїздок приватними автомобілями. У результаті знижуються викиди забруднювальних речовин, зменшується навантаження на дороги, покращується якість повітря та підвищується комфортність міського середовища.

Отже, розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури є важливим інструментом скорочення викидів автотранспорту. Він сприяє формуванню екологічно безпечної, здорової та комфортної міської мобільності, у якій

пріоритет надається людині, а не автомобілю.

Розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури є ефективним способом зменшення залежності населення від приватного автотранспорту та скорочення транспортних викидів у містах. Велодоріжки, велопарковки, пішохідні зони, безпечні переходи, якісні тротуари й безбар'єрне середовище створюють умови для екологічно безпечного пересування. Такі заходи зменшують кількість коротких автомобільних поїздок, сприяють зниженню заторів, покращують якість атмосферного повітря та підвищують комфорт міського середовища. У поєднанні з розвитком громадського транспорту велосипедна та пішохідна інфраструктура є важливою складовою сталої міської мобільності.

4.5. Використання зелених насаджень для зниження впливу транспортного забруднення

Використання зелених насаджень є важливим природоохоронним заходом, спрямованим на зменшення негативного впливу автотранспорту на атмосферне повітря та міське середовище. Рослинність у містах виконує не лише декоративну й рекреаційну функцію, а й має значне екологічне значення. Дерева, кущі, газони та зелені смуги здатні частково затримувати пил, знижувати концентрацію деяких газоподібних забруднювачів, покращувати мікроклімат, зменшувати шумове навантаження та створювати комфортніші умови для населення.

У межах міських територій зелені насадження особливо важливі вздовж автомобільних доріг, магістральних вулиць, перехресть, паркувальних майданчиків, зупинок громадського транспорту, шкіл, лікарень, житлових будинків і громадських просторів. Саме ці території найчастіше перебувають під впливом вихлопних газів, дорожнього пилу, сажі, важких металів і шуму. Тому правильно сплановане озеленення може виконувати роль природного бар'єра між джерелом забруднення та людьми.

Одним із ефективних рішень є створення захисних зелених смуг уздовж доріг. Такі смуги формуються з дерев, кущів, газонів або багаторічних трав, які розміщують між проїжджою частиною та житловою забудовою, тротуарами, навчальними закладами або рекреаційними зонами. Захисні зелені смуги здатні частково зменшувати поширення пилу та аерозолів, затримувати тверді частинки на листовій поверхні, знижувати швидкість повітряного потоку і сприяти розсіюванню забруднювальних речовин.

Ефективність зелених смуг залежить від їхньої ширини, щільності, видового складу рослин, висоти насаджень, пори року, напрямку вітру та характеру транспортного потоку. Найкращий захисний ефект забезпечують багаторядні насадження, які поєднують дерева, кущі та трав'яний покрив. Дерева формують верхній ярус, кущі затримують забруднення на рівні дихання людини, а газони зменшують вторинне піднімання пилу з поверхні ґрунту.

Важливе значення мають зелені коридори. Це система взаємопов'язаних зелених насаджень, які проходять уздовж вулиць, річок, пішохідних і велосипедних маршрутів, парків та скверів. Зелені коридори не лише покращують якість повітря, а й забезпечують екологічну зв'язність міського простору, сприяють збереженню біорізноманіття, покращують умови для пішоходів і велосипедистів, зменшують ефект міського теплового острова.

У контексті скорочення впливу транспортного забруднення зелені коридори доцільно створювати вздовж основних транспортних магістралей, на підходах до зупинок громадського транспорту, біля шкіл, лікарень, житлових кварталів і рекреаційних зон. Вони можуть поєднувати захисні смуги, алеї, сквери, газони, дощові сади та інші елементи зеленої інфраструктури. Такий підхід дозволяє не лише зменшити вплив забруднення, а й підвищити привабливість міського середовища.

Озеленення вулиць є одним із найпоширеніших способів покращення екологічного стану міста. Вуличні дерева створюють тінь, знижують температуру повітря, зменшують перегрівання асфальту, затримують пил і

покращують естетичний вигляд вулиць. У літній період озеленені вулиці є комфортнішими для пішоходів, велосипедистів і пасажирів громадського транспорту. Крім того, дерева сприяють зменшенню швидкості поверхневого стоку під час опадів і частково поглинають вуглекислий газ.

Особливо важливо озеленювати вулиці з інтенсивним рухом, де спостерігається висока концентрація транспортних викидів. Проте під час планування озеленення необхідно враховувати особливості міського простору. Наприклад, у вузьких вулицях із щільною забудовою надто густі насадження можуть погіршувати провітрювання і сприяти накопиченню забруднювачів. Тому в таких умовах важливо добирати рослини та схему посадки так, щоб вони не перешкоджали природному руху повітря.

Механізм зниження транспортного забруднення зеленими насадженнями пов'язаний із кількома процесами. По-перше, листя, гілки та кора рослин затримують пил, сажу й дрібні частинки, які осідають на їхній поверхні. По-друге, рослини можуть частково поглинати газоподібні речовини через породи листків. По-третє, зелені насадження змінюють мікроклімат: знижують температуру, підвищують вологість, зменшують швидкість вітру та створюють сприятливіші умови для перебування людей. По-четверте, вони знижують шумове навантаження, особливо якщо сформовані у вигляді щільних багаторядних смуг.

Таблиця 4.10 Основні екологічні функції зелених насаджень у зонах транспортного впливу

Функція зелених насаджень	Екологічне значення
Затримання пилу та сажі	Зменшення кількості твердих частинок у приземному шарі повітря
Часткове поглинання газоподібних речовин	Зниження впливу окремих забруднювачів на населення
Зменшення шуму	Покращення акустичного комфорту вздовж доріг
Регулювання мікроклімату	Зниження температури повітря, створення тіні,

	підвищення вологості
Захист ґрунтів	Зменшення пиління, ерозії та ущільнення ґрунту
Покращення естетики міста	Підвищення комфортності та привабливості міського середовища
Підтримка біорізноманіття	Створення середовища існування для птахів, комах та інших організмів

Важливим аспектом є правильний добір видового складу рослин. Для озеленення вздовж доріг доцільно використовувати види, стійкі до пилу, загазованості, ущільнення ґрунту, посухи, високих температур, засолення та механічних пошкоджень. Такі рослини повинні мати розвинену крону, достатню листову поверхню, здатність витримувати обрізування та умови міського середовища. Кущі доцільно використовувати для формування нижнього захисного ярусу, оскільки саме на висоті 0,5–2 м перебуває зона дихання пішоходів.

Для захисного озеленення можна використовувати поєднання дерев і кущів. Дерева забезпечують затінення, покращення мікроклімату й затримання пилу на верхньому ярусі, а кущі створюють щільний бар'єр ближче до поверхні землі. Газони та трав'яний покрив зменшують вторинне пиління, закріплюють ґрунт і покращують водопроникність території.

Таблиця 4.11. Приклади елементів озеленення та їхнє призначення

Елемент озеленення	Призначення
Рядові посадки дерев	Затінення вулиць, поглинання пилу, покращення мікроклімату
Кущові смуги	Захист пішоходів від пилу та бризок із дороги
Газони	Зменшення пиління, закріплення ґрунту, покращення вигляду вулиць

Зелені коридори	Поєднання зелених зон і зменшення фрагментації міського простору
Захисні смуги біля доріг	Бар'єр між джерелом забруднення та житловою забудовою
Озеленені зупинки	Покращення умов очікування громадського транспорту
Дощові сади	Затримання поверхневого стоку та забруднювачів із доріг

Окремої уваги потребує озеленення територій біля шкіл, дитячих садків, лікарень і парків. У таких місцях перебувають вразливі групи населення, тому зелені насадження мають виконувати захисну та оздоровчу функцію. Біля шкіл доцільно створювати зелені бар'єри між дорогою і територією закладу, висаджувати дерева вздовж спортивних майданчиків, облаштовувати безпечні пішохідні підходи з озелененням. Біля лікарень зелені насадження сприяють не лише зменшенню забруднення, а й формуванню сприятливого психологічного та рекреаційного середовища.

У парках і скверах, розташованих поруч із дорогами, доцільно створювати буферні зелені зони з боку транспортної магістралі. Найбільш відвідувані частини парків, дитячі та спортивні майданчики бажано розміщувати далі від проїжджої частини. Такий підхід дозволяє зменшити безпосередній вплив вихлопних газів, пилу та шуму на відвідувачів.

Водночас зелені насадження не можна розглядати як повну заміну технічним і організаційним заходам скорочення викидів. Вони лише частково знижують вплив транспортного забруднення, але не усувають його джерело. Якщо інтенсивність руху дуже висока, транспортні засоби технічно застарілі, а на дорогах постійно виникають затори, самі лише зелені насадження не зможуть забезпечити належну якість повітря. Тому озеленення має поєднуватися з розвитком громадського транспорту, обмеженням руху в перевантажених районах, модернізацією автопарку, впорядкуванням

паркування та розвитком пішохідної й велосипедної інфраструктури.

Важливо також забезпечувати догляд за зеленими насадженнями. Рослини, які ростуть уздовж доріг, перебувають у складних умовах: вони зазнають впливу пилу, вихлопних газів, нестачі вологи, ущільнення ґрунту, механічних пошкоджень і протиожеледних реагентів. Без належного догляду дерева й кущі втрачають життєздатність, зменшується їхня листкова поверхня, а отже, знижується і здатність виконувати захисні функції. Догляд має включати полив, обрізування, очищення від сухих гілок, розпушування ґрунту, мульчування, захист стовбурів і заміну пошкоджених рослин.

Зелені насадження також відіграють важливу роль у зменшенні ефекту міського теплового острова. Асфальтовані дороги, бетонні поверхні, паркувальні майданчики й будівлі накопичують тепло, що підвищує температуру повітря в місті. Дерева створюють тінь, знижують температуру поверхонь і сприяють випаровуванню вологи, завдяки чому повітря стає прохолоднішим. Це особливо важливо влітку, коли транспортні викиди поєднуються з високими температурами та поганим провітрюванням.

Крім того, зелені насадження можуть зменшувати негативний вплив дощового стоку з автомобільних доріг. Під час опадів із дорожнього покриття змиваються нафтопродукти, важкі метали, частинки гуми та інші забруднювачі. Використання газонів, біоканав, дощових садів і проникних зелених зон дозволяє частково затримувати й фільтрувати поверхневий стік, знижуючи навантаження на міську каналізаційну систему та водні об'єкти.

Отже, зелені насадження є важливим елементом комплексної системи скорочення впливу транспортного забруднення. Їхнє значення полягає не лише у частковому поглинанні пилу та газоподібних забруднювачів, а й у покращенні мікроклімату, зниженні шуму, підвищенні естетичної цінності міського простору та створенні комфортних умов для населення.

Використання зелених насаджень є ефективним допоміжним заходом зменшення негативного впливу автотранспорту на міське середовище. Зелені коридори, захисні смуги вздовж доріг, озеленення вулиць, висадження дерев і

кущів сприяють частковому затриманню пилу, сажі та інших твердих частинок, покращують мікроклімат, знижують шумове навантаження і підвищують комфортність міських територій. Найбільш ефективними є багаторярусні насадження, які поєднують дерева, кущі та трав'яний покрив. Водночас озеленення не усуває джерело забруднення, тому має застосовуватися разом із технічними й організаційними заходами: розвитком громадського транспорту, обмеженням заторів, модернізацією автопарку та зменшенням використання приватних автомобілів.

4.6. Пропозиції щодо скорочення викидів автотранспорту для конкретної міської території

На основі проведеного аналізу транспортного навантаження та розрахункових викидів забруднювальних речовин у межах м. Івано-Франківська встановлено, що найбільш екологічно напруженими є ділянки з високою інтенсивністю руху, значною кількістю приватного автотранспорту, громадського транспорту та вантажних автомобілів. Дослідження охоплювало три характерні міські ділянки: П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька, П2 - вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу та П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста.

Найвища інтенсивність руху була зафіксована на ділянці П1, де середній транспортний потік становив близько 1001 транспортного засобу за годину. Саме для цієї ділянки характерні найбільші розрахункові викиди CO₂ - 122,49 кг/год, а також найвищі викиди CO - 812,75 г/год і NO_x - 338,92 г/год. Це свідчить про те, що центральна частина міста зазнає найбільшого навантаження від автотранспорту. Ділянка П2 має дещо нижчий рівень викидів, однак через близькість до залізничного вокзалу та активний рух громадського транспорту вона також потребує впровадження природоохоронних заходів. Ділянка П3 характеризується меншою загальною інтенсивністю руху, однак має підвищену частку вантажного транспорту, що

зумовлює високі викиди NO_x і твердих частинок.

Для ділянки П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька - першочерговими заходами мають бути оптимізація дорожнього руху, зменшення заторів і обмеження тривалого простою автомобілів із працюючими двигунами. Доцільно впровадити адаптивне регулювання світлофорів, яке враховуватиме інтенсивність руху в різні періоди доби. Це дасть змогу зменшити кількість зупинок і розгонів транспортних засобів, що безпосередньо впливає на скорочення витрат пального та викидів забруднювальних речовин. Особливо важливим є налаштування світлофорного режиму в ранкові та вечірні години пік, коли кількість транспортних засобів є найбільшою.

Ще одним важливим заходом для центральної частини міста є обмеження в'їзду транзитного транспорту та вантажних автомобілів у перевантажені зони. Для цього доцільно встановити часові обмеження руху вантажного транспорту в центральній частині міста, дозволяючи доставку товарів переважно у ранкові або вечірні години з меншою інтенсивністю руху. Такий підхід дасть змогу зменшити концентрацію транспорту на вузьких міських вулицях, знизити рівень викидів NO_x , CO_2 і пилових частинок, а також покращити безпеку дорожнього руху.

Для ділянки П2 - вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу - доцільно впровадити заходи, спрямовані на організацію громадського транспорту та зменшення хаотичного паркування. Район вокзалу є транспортним вузлом, де поєднуються потоки автобусів, маршрутних таксі, приватних автомобілів, таксі та пішоходів. Через це часто виникають локальні затори, короткочасні зупинки, повторні розгони автомобілів і підвищене навантаження на атмосферне повітря. Для зменшення викидів необхідно впорядкувати зупинки громадського транспорту, облаштувати окремі зони для короткочасної посадки та висадки пасажирів, а також заборонити тривале паркування в місцях, де воно перешкоджає руху.

Важливим заходом для району вокзалу є створення зручної пересадкової зони. Вона має забезпечувати швидкий перехід між залізничним транспортом,

автобусами, маршрутними таксі, велосипедною інфраструктурою та пішохідними маршрутами. Чим зручнішою буде пересадка на громадський транспорт, тим менше мешканці та гості міста будуть використовувати приватні автомобілі для поїздок у центральну частину. Це сприятиме зменшенню загальної кількості транспортних засобів, скороченню витрат пального та зниженню викидів CO₂.

Для ділянки ПЗ - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста - основну увагу слід приділити регулюванню транзитного та вантажного руху. Незважаючи на те, що загальна інтенсивність руху тут нижча, ніж на ділянці П1, частка вантажних автомобілів є вищою, а отже, зростає внесок цієї ділянки у формування викидів NO_x і твердих частинок. Для зменшення екологічного навантаження доцільно обмежити рух великовантажного транспорту в години пік, спрямовувати транзитні потоки на об'їзні маршрути, а також передбачити спеціальні логістичні зони для короткочасного очікування вантажного транспорту поза межами щільної житлової забудови.

Окремим напрямом є оновлення громадського транспорту. У межах усіх досліджуваних ділянок доцільно поступово замінювати застарілі автобуси та маршрутні таксі на транспортні засоби з нижчим рівнем викидів, зокрема автобуси стандарту Euro 5–Euro 6, електробуси або транспорт на альтернативних видах пального. Це дасть змогу скоротити викиди оксидів азоту, сажі та твердих частинок, які є особливо небезпечними для здоров'я населення. Особливу увагу слід приділяти маршрутам, що проходять через центральну частину міста та район вокзалу.

Ефективним способом зменшення транспортних викидів є розвиток велосипедної та пішохідної інфраструктури. Для Івано-Франківська доцільно розширювати мережу безпечних велосипедних смуг, облаштовувати велопарковки біля вокзалу, навчальних закладів, адміністративних установ, торговельних центрів і зупинок громадського транспорту. Розвиток пішохідних зон у центральній частині міста дозволить скоротити кількість коротких поїздок приватними автомобілями, які є екологічно неефективними

через підвищені викиди під час частих запусків двигуна, зупинок і розгонів.

Важливе значення має також організація паркувального простору. Нерегульоване паркування зменшує пропускну здатність вулиць, спричиняє затори та збільшує тривалість роботи двигунів на холостому ходу. У центральній частині міста необхідно впроваджувати платне короткочасне паркування, обмежувати стоянку на вузьких вулицях, створювати перехоплювальні паркінги на в'їздах до міста та стимулювати пересадку на громадський транспорт. Для ділянки ПЗ це особливо актуально, оскільки вона може виконувати функцію зони перехоплення частини автомобільного потоку перед в'їздом у центральну частину міста.

Для зменшення впливу транспортних викидів на населення доцільно посилити озеленення вулиць. Уздовж досліджуваних ділянок слід створювати багаторярусні зелені насадження, які поєднують дерева, кущі та трав'яний покрив. Зелені смуги не усувають джерело забруднення, однак сприяють частковому затриманню пилу, сажі та твердих частинок, покращують мікроклімат, зменшують шумове навантаження та підвищують комфортність міського середовища. Особливо доцільним є озеленення ділянок із високою інтенсивністю руху та поблизу житлових будинків, навчальних закладів і місць масового перебування населення.

Доцільно також впровадити локальний моніторинг якості атмосферного повітря на найбільш навантажених ділянках. Для цього можна використовувати стаціонарні або мобільні пости спостереження, які фіксуватимуть концентрації CO, NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ та інших забруднювальних речовин. Дані моніторингу доцільно поєднувати з інформацією про інтенсивність руху, погодні умови та час доби. Це дозволить виявляти періоди найбільшого забруднення, оцінювати ефективність упроваджених заходів і приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Для підвищення ефективності природоохоронних заходів необхідно поєднувати технічні, організаційні та планувальні рішення. Технічні заходи мають включати оновлення транспортних засобів, контроль технічного стану

автомобілів, використання якісного пального та впровадження електротранспорту. Організаційні заходи повинні передбачати оптимізацію світлофорного регулювання, обмеження руху вантажного транспорту, упорядкування паркування та розвиток громадського транспорту. Планувальні заходи мають бути спрямовані на формування пішохідних і велосипедних зон, створення перехоплювальних паркінгів, озеленення вулиць і зменшення потреби у використанні приватного автомобіля.

Очікуваний екологічний ефект від реалізації запропонованих заходів полягає у зменшенні викидів CO₂, CO, NO_x, PM_{2.5}, сажі та летких органічних сполук, зниженні рівня шумового навантаження, покращенні якості атмосферного повітря та підвищенні комфортності міського середовища. Найбільший ефект можна отримати за умови комплексного впровадження заходів: оптимізації руху на ділянці П1, впорядкування транспортного вузла на П2 та обмеження транзитного вантажного руху на П3.

Для скорочення викидів автотранспорту в межах досліджуваної міської території м. Івано-Франківська необхідно застосовувати диференційований підхід до кожної ділянки. Для центральної частини міста пріоритетними є зменшення заторів, розвиток громадського транспорту та обмеження приватного автотранспорту. Для району вокзалу важливими є організація пересадкової інфраструктури, впорядкування зупинок і паркування. Для в'їзду/виїзду з міста основну увагу слід приділити управлінню транзитним і вантажним транспортом. Комплексне впровадження цих заходів дозволить зменшити екологічне навантаження, покращити якість повітря та підвищити рівень екологічної безпеки міського середовища.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі досліджено проблему скорочення викидів автотранспорту в межах міських територій та обґрунтовано необхідність упровадження комплексних технічних, організаційних, планувальних і природоохоронних заходів для зменшення негативного впливу транспорту на атмосферне повітря, здоров'я населення та міські екосистеми.

У процесі виконання роботи встановлено, що автотранспорт є одним із найбільш поширених і небезпечних джерел забруднення атмосферного повітря в містах. Його особливість полягає в тому, що викиди формуються безпосередньо в зоні проживання, навчання, праці та відпочинку населення. Основними забруднювальними речовинами, що надходять в атмосферу від автотранспорту, є оксид вуглецю, діоксид вуглецю, оксиди азоту, леткі органічні сполуки, тверді частинки PM_{10} і $PM_{2.5}$, сажа, бензапірен та важкі метали. Доведено, що транспортне забруднення має комплексний характер, оскільки включає не лише вихлопні гази, а й невихлопні джерела - зношування шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття, повторне піднімання пилу, шумове та теплове навантаження.

Проаналізовано вплив транспортних викидів на здоров'я населення та стан міського довкілля. Встановлено, що найбільшу небезпеку становлять дрібнодисперсні тверді частинки, оксиди азоту, оксид вуглецю, сажа, бензапірен і важкі метали, які можуть негативно впливати на органи дихання, серцево-судинну систему, загальне самопочуття людей і якість життя в місті. Особливо вразливими до дії транспортного забруднення є діти, люди похилого віку, вагітні жінки та особи з хронічними захворюваннями. Крім того, транспортні викиди погіршують стан зелених насаджень, сприяють накопиченню забруднювачів у ґрунтах, посилюють запиленість територій і формують несприятливі мікрокліматичні умови в районах щільної забудови.

У роботі розглянуто нормативно-правові засади регулювання викидів автотранспорту. Визначено, що ефективне скорочення транспортного

забруднення має ґрунтуватися на дотриманні вимог природоохоронного законодавства, санітарних нормативів якості атмосферного повітря, системи державного моніторингу, технічного контролю транспортних засобів та поступової гармонізації українських підходів із європейськими екологічними стандартами. Особливого значення набуває врахування не лише вихлопних, а й невихлопних джерел забруднення, що є актуальним навіть за умов розвитку електротранспорту.

Проведений аналіз міської транспортної системи засвідчив, що рівень екологічного навантаження залежить від інтенсивності руху, структури транспортного потоку, технічного стану автопарку, наявності заторів, організації паркування, режиму руху та рівня розвитку громадського транспорту. Найбільш небезпечними є ділянки з високою інтенсивністю руху, частими зупинками й розгонами, значною часткою приватних автомобілів, автобусів і вантажного транспорту, а також території поблизу житлової забудови, навчальних закладів, лікарень і громадських просторів.

На прикладі м. Івано-Франківська здійснено оцінку транспортного навантаження та розрахункових викидів забруднювальних речовин на трьох характерних міських ділянках: П1 - вул. Незалежності – вул. Галицька, П2 - вул. Вовчинецька – район залізничного вокзалу, П3 - вул. Галицька – в'їзд/виїзд з міста. Встановлено, що найбільш екологічно напруженою є ділянка П1, де середній транспортний потік становив близько 1001 транспортного засобу за годину. Саме для цієї ділянки характерні найбільші розрахункові викиди: CO_2 - 122,49 кг/год, CO - 812,75 г/год, NO_x - 338,92 г/год. Це свідчить про значне транспортне навантаження центральної частини міста та необхідність першочергового впровадження природоохоронних і транспортно-організаційних заходів.

Обґрунтовано, що скорочення викидів автотранспорту має здійснюватися шляхом поєднання кількох груп заходів. До технічних заходів належать модернізація двигунів, використання каталізаторів і сажових фільтрів, поліпшення технічного стану транспортних засобів, застосування

якісного пального, розвиток електротранспорту та поступове оновлення автопарку. Організаційні заходи передбачають оптимізацію схем дорожнього руху, адаптивне світлофорне регулювання, обмеження руху вантажного транспорту в центральних і житлових районах, створення виділених смуг для громадського транспорту, упорядкування паркування та запровадження зон спокійного руху.

Важливим напрямом зменшення транспортного навантаження є розвиток екологічного громадського транспорту, велосипедної та пішохідної інфраструктури. Збільшення частки електробусів, тролейбусів, трамваїв, зручних автобусних маршрутів, велодоріжок і безпечних пішохідних просторів сприятиме зменшенню використання приватних автомобілів, скороченню заторів, зниженню локальних викидів і покращенню якості міського середовища. Не менш важливим є озеленення транспортних коридорів, створення захисних зелених смуг, висадження стійких до забруднення видів дерев і кущів, а також догляд за зеленими насадженнями вздовж магістралей.

Для м. Івано-Франківська запропоновано першочергово впроваджувати заходи на найбільш навантажених ділянках, зокрема в центральній частині міста та біля транспортних вузлів. Доцільними є оптимізація світлофорного регулювання, обмеження транзитного руху через центральні вулиці, розвиток громадського транспорту, створення перехоплювальних паркінгів, упорядкування паркування, розширення велосипедної інфраструктури, збільшення площі озеленення та регулярний моніторинг якості атмосферного повітря.

Отже, мету бакалаврської роботи досягнуто, а поставлені завдання виконано. Доведено, що зменшення викидів автотранспорту в межах міських територій можливе лише за умови комплексного підходу, який поєднує технічне оновлення транспортних засобів, ефективне управління дорожнім рухом, розвиток екологічного громадського транспорту, обмеження надмірного використання приватних автомобілів, розширення зелених

насаджень і системний моніторинг атмосферного повітря. Реалізація запропонованих заходів сприятиме покращенню якості повітря, зниженню екологічних ризиків, підвищенню безпеки та комфортності міського середовища, а також формуванню сталої транспортної системи міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анісімов В. Ф., Пришляк В. М., П'ясецький А. А., Бурлака С. А. Експериментальне дослідження відпрацьованих газів дизельних двигунів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. Вип. 12. С. 56–66. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/> (дата звернення: 12.06.2026).
2. Башинська І. О., Філіппов В. Ю. Проблеми та шляхи удосконалення функціонування міського пасажирського транспорту. *Економіка. Фінанси. Право*. 2017. Вип. 7/1. С. 24–28.
3. Говорун А. Г., Скорченко В. Ф., Худолій М. М. *Транспорт і навколишнє середовище*. Київ : Урожай, 1992. 144 с.
4. Грабельников В. А. Організація регулювання системи міського громадського пасажирського транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень ДНУ*. 2014. Вип. 8. С. 35–39.
5. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. Київ, 2014. 54 с.
6. Джерела забруднення повітря в Україні. Міністерство екології та природних ресурсів України, 2021.
7. Екологія автомобільного транспорту : навч. посіб. / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун та ін. Київ : Основа, 2002. 312 с.
8. Зеленько Ю. В., Недужа Л. О. Прогнозування та моделювання шумового навантаження. Сучасні підходи до створення шумових карт залізниць. *Локомотив-інформ*. 2015. Вип. 09–10. С. 12–16.
9. Індекс якості повітря в Україні за 2020 рік. Онлайн-ресурс «Арсеналінфо», 2021.
10. Інформаційний бюлетень «Якість повітря в Україні: стан та тенденції за 2020 рік». Всесвітня організація охорони здоров'я в Україні, 2021.
11. Методичні рекомендації з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою / ДП «ДержавтотрансНДІпроект». Редакція 1 від 17.11.2023.

12. Міщенко О. В. та ін. Аналіз впливу екологічних факторів на здоров'я населення: науково-практичні аспекти. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Екологія*. 2019. № 31. С. 42–50.
13. Мямлін С. В., Зеленько Ю. В., Недужа Л. О. *Параметрична екологія на залізничному транспорті. Принципи, оцінка, контроль, безпека* : монографія. Дніпро : Літограф, 2014. 203 с.
14. Носовська О. Б. Проблеми та перспективи України. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2014. Вип. 27. С. 5–14.
15. Прасоленко О. В., Марченко В. Ф. Вплив мережі паркування автомобільного транспорту на параметри руху транспортних потоків. *Комунальне господарство міст*. 2003. № 81. С. 218.
16. Про затвердження Державної стратегії екологічної безпеки України на період до 2025 року : Указ Президента України від 06.06.2017 р. № 133/2017.
17. Статистика забруднення атмосферного повітря викидами від транспорту. URL: <https://www.gpp.in.ua/transport/zabrudnennya-atmosfernogo-povitrya-vikidamividtransportu.htm> (дата звернення: 12.06.2026).
18. Транспортна екологія : навч. посіб. / О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвєєва, С. Й. Шаманський та ін. Київ, 2017. 360 с.
19. Шумський В. М. та ін. Аналіз стану та тенденцій забруднення атмосферного повітря в Україні. *Інноваційна економіка*. 2020. № 1. С. 76–81.
20. Яремчук О. М., Пулашкін В. Ю. Картографування шумового забруднення автомагістралей м. Миколаєва засобами ГІС-технологій з використанням програмного пакету ArcGIS. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*. 2019. № 2(21). С. 132–139. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.132-139.
21. DG MOVE. European Commission. *Study on Urban Freight Transport*. 2012.
22. Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010.

23. Ferranti E., Levine J., MacKenzie R. Role of trees and other green infrastructure in urban air quality. *Environmental Scientist*. 2019. March. URL: <https://www.the-ies.org/analysis/role-trees-and-other-green> (дата звернення: 12.06.2026).
24. Hess S., Quddus M., Rieser-Schüssler N., Daly A. Developing advanced route choice models for heavy goods vehicles using GPS data. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2015. Vol. 77. P. 29–44. DOI: 10.1016/j.tre.2015.01.010.
25. Hewitt C. N., Ashworth K., MacKenzie A. R. Using green infrastructure to improve urban air quality (GI4AQ). *Ambio*. 2020. Vol. 49. P. 62–73. DOI: 10.1007/s13280-019-01164-3.
26. Highly Automated Vehicle Systems. 2019. URL: http://old.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszer_kiranyitasa_angol/index.html (дата звернення: 12.06.2026).
27. Hughes S., Moreno S., Yushimito W., Huerta-Cánepa G. Evaluation of machine learning methodologies to predict stop delivery times from GPS data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Vol. 109. P. 289–304. DOI: 10.1016/j.trc.2019.10.018.
28. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. United States Department of Transportation. 2021. URL: <https://www.pcb.its.dot.gov/eprimer/module8.aspx#intro> (дата звернення: 12.06.2026).
29. Mobility and Transport of European Commission. Action Plan and Directive. 2021. URL: https://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action_plan_en (дата звернення: 12.06.2026).
30. Nuzzolo A., Crisalli U., Comi A., Rosati L. An Advanced Traveller Advisory Tool Based on Individual Preferences. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 160. P. 539–547.

31. Nuzzolo A., Lam W. *Modelling Intelligent Multi-Modal Transit Systems*. CRC Press, 2016. 338 p.
32. Osipov G. L., Boblev V. N., Borysov L. A. *Sound-insulating and sound absorption*. Moscow : AST, 2004.
33. Ovsianikov M. S. Construction of noise pollution maps by the method of iterative tracing of sources. *Current Issues of Construction Physics : IV Academic Readings*. 2012.
34. Picone M., Amoretti M., Zanichelli F., Ferrari G., Busanelli S. *Advanced Technologies for Intelligent Transportation Systems*. Springer, 2015. 238 p.
35. Pluvinet P., Gonzalez-Feliu J., Ambrosini C. GPS Data Analysis for Understanding Urban Goods Movement. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. Vol. 39. P. 450–462. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.03.121.
36. Popov V. I., Baltcars P. Ya., Baranovsky A. E. Noise from railway transport. Mathematical model CRN. *47th International Scientific Conference*, October 11–13, 2008. Riga : Riga Technical University, 2008. CD-ROM.
37. Sayeg P., Charles P. *Intelligent Transport System Module 4e. Sustainable Transport: A Source Book for Policy-Makers in Developing Cities*. Transport Policy Advisory Services, 2009.
38. Science for Environment Policy. *Noise abatement approaches*. Future Brief. 2017. Issue 17. 32 p.
39. Shishelova T. I., Malygina Yu. S., Nguyen Xuan Dat. Influence of noise on the human organism. *Achievements of Modern Natural Science*. 2009.
40. The European Electronic Toll Service (EETS). *Guide for the Application of the Directive on the Interoperability of Electronic Road Toll Systems*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2011. 78 p.
41. Urban design can help improve air quality. URL: <https://practicalmotoring.com.au/car-news/urban-design-can-help-improve-air-quality/> (дата звернення: 12.06.2026).
42. Williams B. *Intelligent Transport Systems Standards*. Artech House, 2008. 827 p.