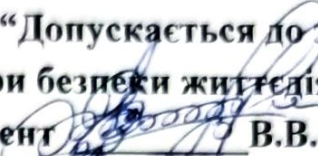



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Спеціальність 101 «Екологія»

“Допускається до захисту”
Зав. кафедри безпеки життєдіяльності
доцент  В.В. СКИБА
“5”  2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

ОЦІНКА ВПЛИВУ ІНТЕНСИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО РУХУ НА
ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ОКСИДОМ ВУГЛЕЦЮ В УМОВАХ
МІСТА БОГУСЛАВ

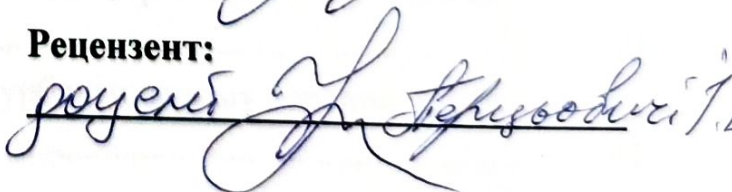
Виконав:

Остапенко Віталій Сергійович

Керівник: доктор с.-г. наук

доцент  В.В. Скиба

Рецензент:

 В.В. Скиба

*Я, Остапенко Віталій Сергійович, засвічую, що кваліфікаційну роботу
виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності.*

Біла Церква - 2025

Зміст

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	
1.1. Роль автомобільного транспорту у формуванні техногенного навантаження на атмосферне повітря.....	11
1.2. Склад, характеристики та екологічна небезпека викидів автотранспортних засобів.....	13
1.3. Вплив забруднювачів автомобільного походження на стан навколишнього середовища та здоров'я населення.....	15
1.4. Сучасні стратегії та технології зниження екологічного навантаження автомобільного транспорту.....	17
1.5. Перспективні напрями розвитку екологічно безпечного транспорту.....	22
Методи обробки результатів.....	22
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	
2.1. Характеристика умов проведення досліджень	24
2.2. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин.....	36
2.3. Методика розрахунку концентрації забруднюючих речовин.....	27
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	
3.1. Вибір дослідних точок та формування вихідних даних для розрахунку забруднення.....	29
3.2. Порівняльна оцінка вмісту оксиду вуглецю (СО) на дослідних ділянках м. Богуслав.....	34
3.2.1. Розрахунок середньозваженого питомого викиду СО.....	34
3.2.2. Розрахунок потужності викиду та максимальної приземної концентрації.....	37
3.2.3. Порівняльний аналіз СО у порівнянні з гранично допустимою концентрацією.....	39
3.3. Вплив оксиду вуглецю на біоту в урбанізованому середовищі та екологічна безпека населення.....	41
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	43
ВИСНОВКИ.....	46
ПРОПОЗИЦІЇ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Екологічний факультет
Спеціальність: 101 «Екологія»

Затверджую
Гарант ОП «Екологія»
доцент Скиба В.В.
« 10 » лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу здобувачу

Остапенко Віталій Сергійович

прізвище, ім'я та по батькові

Тема: **ОЦІНКА ВПЛИВУ ІНТЕНСИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО
РУХУ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ОКСИДОМ ВУГЛЕЦЮ В
УМОВАХ
МІСТА БОГУСЛАВ**

Затверджено наказом ректора № 543/К від « 12 » листопада 2025 р.

Термін здачі здобувачам готової кваліфікаційної роботи в деканат:

до « 6 » листопада 2025 р.

1. Перелік питань, що розробляються в роботі. Вихідні дані:
2. Опрацювати не менше 40 літературних джерел (підручники, вісники, журнали, наукові статті, звіти екологічної інспекції тощо) стосовно теми роботи та написати розділ «Огляд літератури».
3. Опрацювати розділ «Матеріали та методика» випускної роботи.
4. Проаналізувати теоретичні засади та визначити ключові компоненти токсичності відпрацьованих газів автомобільного транспорту, а також оцінити їх вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини.
5. Узагальнити та систематизувати сучасні технологічні підходи до екологізації транспорту, включаючи вдосконалення ДВЗ, роль каталітичних нейтралізаторів та систем рециркуляції вихлопних газів (EGR), а також вимоги екологічних стандартів «Євро».

6. Проаналізувати роль міського планування та управління транспортними потоками, зокрема впровадження зон обмеженого руху (LEZ) та інтелектуальних транспортних систем (ITS), у зниженні екологічного навантаження.

7. Вивчити перспективні напрями розвитку екологічно безпечного транспорту, зосередивши увагу на альтернативних видах палива (водень, біопаливо), розвитку електромобілів (EV) та концепції сталого міського руху (SUM).

8. На основі міжнародного досвіду та проведеного аналізу розробити комплекс науково-практичних рекомендацій щодо підвищення екологічної безпеки автомобільного транспорту в містах.

Календарний план виконання роботи

Етап виконання	Дата виконання етапу	Відмітка про виконання
Огляд літератури	01.10.2025 р.	виконав
Методична частина	15.10.2025 р.	виконав
Дослідницька частина	01.11.2025 р.	виконав
Оформлення роботи	15.11.2025 р.	виконав
Перевірка на плагіат	01.12.2025 р.	перевірено
Попередній розгляд на кафедрі	05.12.2025 р.	перано, розглянуто
Подання на рецензування	10.12.2025 р.	перано

Керівник кваліфікаційної роботи, доцент

Скиба В.В.

Здобувач

Остапенко В.С.

Дата отримання завдання «7» листопада 2024р.

АНОТАЦІЯ

Остапенко Віталій Сергійович

ОЦІНКА ВПЛИВУ ІНТЕНСИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНОГО РУХУ НА ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ОКСИДОМ ВУГЛЕЦЮ В УМОВАХ МІСТА БОГУСЛАВ

Кваліфікаційна робота присвячена оцінці впливу автомобільного транспорту на стан атмосферного повітря м. Богуслав Київської області. Основну увагу зосереджено на оксиді вуглецю як одному з найхарактерніших забруднювачів повітря в зонах інтенсивного руху. Робота виконана на основі власних обліків транспортних потоків та розрахунків приземних концентрацій у характерних точках міської забудови.

У роботі обґрунтовано вибір трьох дослідних точок з різним транспортним навантаженням: перехрестя вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка, ділянка вул. Івана Франка – вул. Миколаївська та перехрестя вул. Корсуньська – вул. Нагірна. Для цих ділянок виконано розрахунок середньозваженого питомого викиду оксиду вуглецю, потужності викиду та максимальної приземної концентрації.

За результатами розрахунків найбільше навантаження зафіксовано на перехресті вул. Корсуньська – вул. Нагірна, де максимальна приземна концентрація CO становила 4,64 мг/м³, або 92,8 % від максимально разової ГДК. На перехресті вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка розраховано 3,95 мг/м³, а на ділянці вул. Івана Франка – вул. Миколаївська – 3,22 мг/м³.

На підставі отриманих результатів запропоновано практичні заходи для умов м. Богуслав: перегляд режиму роботи світлофорного об'єкта на перехресті вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка, упорядкування зупинки та короткочасної стоянки транспорту на ділянці вул. Івана Франка – вул. Миколаївська, а також обмеження тривалого перебування вантажного

транспорту на ділянці вул. Корсуньська – вул. Нагірна в години найбільшого навантаження.

Структура кваліфікаційної роботи включає Вступ, три основні розділи, Висновки та Практичні рекомендації. Робота містить 50 сторінок, 7 таблиць, 4 рисунки і список використаної літератури із 45 джерел.

Ключові слова: екологічна оцінка, атмосферний моніторинг, місто Богуслав, автомобільний транспорт, чадний газ.

ANNOTATION

Vitalii OSTAPENKO

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF TRAFFIC INTENSITY ON AIR POLLUTION BY CARBON MONOXIDE IN THE CONDITIONS OF THE CITY OF BOHUSLAV

The qualification thesis is devoted to a comprehensive study of the environmental assessment of the impact of road transport on the state of atmospheric air in the city of Bohuslav, Kyiv region. The main focus is on monitoring the concentrations of key air pollutants (CO, NO_x, PM) in areas with different traffic loads and assessing the associated environmental risks for the population. The research aims to analyze actual pollution levels and develop evidence-based recommendations to reduce environmental pressure.

The study involves the selection and justification of three sampling points with different traffic intensities: the central intersection (Point 1), a public transport stop on Shevchenko Street (Point 2), and a control rural area (Point 3). A comparative analysis of the measured concentrations of carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x) with the maximum permissible concentrations (MPC) was carried out, along with an overview of modern international transport greening strategies (Euro standards, SUM, ITS).

Based on the monitoring results, several key problems were identified: at Points 1 (central intersection) and 2 (bus stop), systematic exceedances of the daily average MPC for CO (up to 1.8 times) and NO_x (up to 1.5 times) were recorded compared to the control zone, indicating a high level of local air pollution. A direct correlation was found between traffic intensity in idling mode and CO concentrations in public transport stop areas.

As a result of the research, a number of practical recommendations were proposed: the implementation of intelligent transport systems (ITS) to optimize traffic light control and reduce waiting time at stops; the creation of buffer green

zones around major roads; incentives for the use of electric vehicles (EV); and the development of a sustainable urban mobility (SUM) concept to reduce private car use.

The structure of the qualification thesis includes an Introduction, three main Chapters, Conclusions, and Practical Recommendations. The thesis consists of 50 pages, 7 tables, 4 figures, and a list of 45 references.

Keywords: environmental assessment, air monitoring, city of Bohuslav, road transport, carbon monoxide.

ВСТУП

Зростання урбанізації та інтенсифікація автомобільного руху в містах супроводжуються збільшенням викидів забруднюючих речовин, серед яких оксид вуглецю, оксиди азоту, вуглеводні та тверді частинки. У великих містах України частка автотранспорту в загальному забрудненні атмосферного повітря становить 60–80 %, а на окремих магістралях може бути ще вищою [12, 16, 23, 24, 33]. Це безпосередньо позначається на якості повітря і стані здоров'я населення [39, 40].

Зниження негативного впливу транспорту на атмосферне повітря потребує поєднання технічних і організаційних заходів: удосконалення двигунів внутрішнього згорання, оновлення автопарку, розвитку громадського транспорту та впорядкування руху в межах міста [42, 43]. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища, навіть за сучасних екологічних стандартів у вузлах інтенсивного руху рівень забруднення повітря часто залишається підвищеним [40, 43].

Українські дослідження також підтверджують, що найбільш проблемними є ділянки біля світлофорних об'єктів, зупинок громадського транспорту та перехресть із нерівномірним режимом руху [17, 22, 25]. Для таких умов важливими є не лише технічний стан автомобілів, а й організація руху, наявність зелених насаджень та особливості забудови, які впливають на розсіювання домішок [41, 42].

Для невеликих міст, зокрема для Богуслава, ця проблема також є актуальною, оскільки локальні транспортні вузли можуть створювати відчутне навантаження на повітряне середовище. Тому оцінка впливу інтенсивності автомобільного руху на забруднення повітря оксидом вуглецю є необхідною для розробки практичних заходів з боку місцевої влади.

Мета роботи – оцінити вплив автомобільного руху на забруднення повітря оксидом вуглецю в умовах м. Богуслав та запропонувати заходи щодо його зменшення.

Об'єкт дослідження – автомобільний транспорт як джерело забруднення атмосферного повітря в міському середовищі.

Предмет дослідження – рівень забруднення повітря оксидом вуглецю на ділянках м. Богуслав з різною інтенсивністю руху, а також чинники, що визначають формування цього забруднення.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Роль автомобільного транспорту у формуванні техногенного навантаження на атмосферне повітря

Сучасна екологічна наука розглядає мобільні джерела викидів як домінуючий чинник деградації якості повітряного середовища в урбанізованих екосистемах. Численні фундаментальні дослідження переконливо стверджують, що міський автомобільний транспорт генерує від 70% до 90% загального обсягу антропогенних викидів у приземному шарі атмосфери. Транспортна інфраструктура, що характеризується високою інтенсивністю руху приватного та комерційного автотранспорту, є головним постачальником широкого спектра ксенобіотиків, серед яких ключове місце посідають оксиди азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, неметанові леткі органічні сполуки та специфічні канцерогенні сполуки. Особливу небезпеку становлять тверді частинки (пил), які утворюються не лише в процесі згоряння палива, а й внаслідок зносу гальмівних колодок, шин та ерозії дорожнього полотна.

Ці забруднювачі акумулюються безпосередньо у зоні дихання людини, що становить серйозну загрозу для здоров'я населення, особливо у густонаселених районах з каньйонним типом забудови та обмеженою природною вентиляцією. У масштабній роботі Wang, B., Lv та ін. (2022), присвяченій моніторингу в місті Цзінань, було доведено, що концентрації CO і NO₂ безпосередньо поблизу автомагістралей перевищують фонові рівні у кілька разів під час ранкових та вечірніх годин пікового трафіку [22]. Дослідження акцентує увагу на тому, що токсичність викидів корелює не лише із загальною кількістю транспортних одиниць, а й із режимами дорожнього руху. Затори, часті цикли зупинок та прискорень, а також тривала робота двигунів на холостому ході призводять до неповного згоряння палива, що значно збільшує викиди шкідливих газів.

Глобальний ретроспективний аналіз, представлений у звіті «Vehicle Emissions and Urban Air Quality», демонструє складну динаміку між технологічним прогресом та екологічним станом міст. Незважаючи на те, що сумарний світовий пробіг автомобілів зріс у десятки разів, впровадження жорстких стандартів серії «Євро», обов'язкове застосування каталітичних нейтралізаторів та сажових фільтрів дозволили суттєво знизити питомі викиди на одиницю відстані [14]. Проте цей прогрес часто нівелюється процесом швидкої автомобілізації населення та тривалою експлуатацією застарілого автопарку. Для умов України, де середній вік автомобілів залишається досить високим, модернізація та оновлення транспортних засобів є стратегічними пріоритетами для зниження техногенного тиску на довкілля.

Нова парадигма міського планування пропонує вирішувати проблему через фундаментальну трансформацію просторової структури міст. Концепція компактного міста та розвиток інтегрованої пішохідно-велосипедної інфраструктури здатні значно знизити залежність від приватних авто. Дослідження 2020 року «Urban and transport planning pathways to carbon neutral cities» вказує на те, що розвиток громадського транспорту призводить до прямого зниження викидів вуглецю [11]. Порівняльний аналіз цих стратегій із логістичною структурою руху в місті Богуслав виявляє подібні системні виклики: високу частку коротких поїздок, під час яких двигун не встигає вийти на оптимальний температурний режим, та недосконалість маршрутних мереж, що провокує застійні явища.

Ефективність адміністративного регулювання підтверджується досвідом впровадження тимчасових обмежень у великих мегаполісах, де завдяки регулюванню в'їзду вантажного транспорту та оптимізації графіків руху вдавалося досягти радикального зниження концентрації забруднювачів [2]. Це свідчить про те, що навіть без миттєвої заміни всієї технологічної бази, лише шляхом раціоналізації транспортних потоків та інтелектуального управління трафіком можна досягти відчутного оздоровлення повітряного басейну.

Додатковим фактором ускладнення ситуації є явище розростання міст, яке примушує мешканців щоденно долати значні відстані, збільшуючи кумулятивні викиди [5]. Встановлено, що підвищення ефективності та привабливості громадського транспорту є найбільш дієвим інструментом протидії цим ефектам, оскільки дозволяє значно знизити питоме забруднення на одного пасажера. Загалом, рівень навантаження на атмосферу визначається синергією технологічного стану автопарку, конфігурації дорожньої мережі, поведінкових звичок водіїв та системності державної екологічної політики. Зазначені чинники є базовими для проведення екологічної оцінки у межах даного дослідження, оскільки вони дозволяють моделювати рівні розсіювання забруднюючих речовин залежно від інтенсивності транспортних потоків та пропонувати науково обґрунтовані заходи захисту повітряного середовища.

1.2. Склад, характеристики та екологічна небезпека викидів автотранспортних засобів

Автотранспорт на сьогодні є одним із найпотужніших і найдинамічніших джерел антропогенного забруднення атмосфери, особливо у великих містах і промислових центрах. У процесі роботи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) утворюється широкий спектр шкідливих речовин, які мають складний хімічний склад, різний механізм утворення та різний ступінь впливу на довкілля і здоров'я людини. Дослідження показують, що частка автотранспорту у загальному обсязі атмосферних викидів у містах сягає 65–80%, а у мегаполісах цей показник може перевищувати 90% [1, 4].

Основними компонентами вихлопних газів є: оксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO і NO₂, об'єднані в групу NO_x), вуглеводні (CH), сірчистий ангідрид (SO₂), бенз(а)пірен, альдегіди, тверді частинки (сажові елементи), а також діоксид вуглецю (CO₂), який хоч і не є токсичним, але є головним парниковим газом. Крім того, у вихлопах присутні важкі метали (свинець, кадмій, нікель, цинк), продукти неповного згоряння палива, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) та інші токсиканти [2, 5].

Оксид вуглецю (CO) є безбарвним і без запаху газом, який утворюється при неповному згорянні палива в двигуні. Його токсична дія зумовлена здатністю утворювати з гемоглобіном крові стабільне з'єднання – карбоксигемоглобін, що блокує транспортування кисню до тканин. У містах концентрація CO поблизу автомагістралей може перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК) у 2–5 разів, що становить серйозну небезпеку для здоров'я людей, особливо дітей і людей із серцево-судинними захворюваннями [6].

Оксиди азоту (NO_x) утворюються при високих температурах згорання палива в результаті реакції азоту та кисню повітря. Ці сполуки належать до найнебезпечніших атмосферних токсикантів, оскільки беруть участь у фотохімічних реакціях, утворюючи вторинні забруднювачі – озон, пероксиацетилнітрати та інші складові фотохімічного смогу. NO_x викликають подразнення дихальних шляхів, бронхіти, астму та інші респіраторні захворювання [7].

Вуглеводні (CH) і альдегіди, що утворюються через неповне згорання палива, можуть бути канцерогенними або мутагенними. Особливу небезпеку становить бенз(а)пірен, який належить до сильних канцерогенів навіть у низьких концентраціях. Ці сполуки також беруть участь у фотохімічних реакціях і утворенні тропосферного озону [8].

Сірчистий ангідрид (SO_2) утворюється при спалюванні палива, яке містить сірку. Він подразнює слизові оболонки, сприяє розвитку бронхітів та астми, а також бере участь у формуванні кислотних дощів, що призводить до закислення ґрунтів і водних екосистем [9].

Тверді частинки (PM) – це сажа, мікрочастинки металів, золи, які здатні проникати глибоко в легені і навіть у кровоносну систему. Їхня наявність у повітрі тісно пов'язана з розвитком серцево-судинних і онкологічних захворювань. Дрібнодисперсні частинки $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} визнаються Всесвітньою організацією охорони здоров'я одними з найнебезпечніших атмосферних поллютантів [10].

Кількість і склад вихлопних газів залежать від ряду факторів: типу двигуна (бензиновий, дизельний, газовий), якості палива, технічного стану транспортного засобу, режиму роботи двигуна, умов експлуатації тощо. Наприклад, двигуни з неповною подачею кисню виробляють більше CO та CH, тоді як при високих температурах і надлишку повітря зростає частка NO_x [3]. Значну роль відіграють також конструктивні особливості системи живлення та згоряння, наявність або відсутність каталізаторів, систем рециркуляції вихлопних газів (EGR) та фільтрів твердих частинок (DPF). Сучасні каталізатори трикомпонентного типу здатні зменшити викиди CO, CH і NO_x на 85–95%, однак ефективність їхньої роботи знижується у разі використання неякісного палива або несправності системи запалювання [4]. У дизельних двигунах для зменшення викидів частинок застосовуються сажові фільтри, а для зниження концентрацій NO_x – системи селективного каталітичного відновлення (SCR) [11].

Компоненти вихлопних газів автотранспорту не лише безпосередньо впливають на здоров'я людини, але й беруть участь у глобальних атмосферних процесах. Так, CO та CH впливають на концентрацію тропосферного озону, NO_x сприяють утворенню кислотних опадів, а CO₂ разом з CH₄ та N₂O – формуванню парникового ефекту. За оцінками Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC), автотранспорт є джерелом понад 15% глобальних викидів CO₂ антропогенного походження [12]. У сукупності ці процеси призводять до зміни клімату, деградації екосистем, зниження якості повітря та загрози здоров'ю населення.

Таким чином, вихлопні гази автотранспортних засобів – це складна багатокомпонентна суміш, кожен елемент якої становить серйозну небезпеку для довкілля та людини. Їхній вплив виходить далеко за межі локального рівня, зумовлюючи трансформаційні процеси в атмосфері, зміну клімату, деградацію природних систем і підвищення захворюваності населення. Саме тому аналіз складу, властивостей та механізмів утворення викидів є базовим елементом будь-якої екологічної оцінки впливу транспорту.

1.3. Вплив забруднювачів автомобільного походження на стан навколишнього середовища та здоров'я населення

Автотранспорт у сучасному урбанізованому світі виступає одним з ключових факторів антропогенного впливу на довкілля, визначаючи рівень екологічної безпеки міст та якість життя їх населення. За даними Європейського агентства з охорони довкілля, на частку автотранспорту припадає понад 70% усіх забруднень атмосферного повітря у великих містах ЄС, а в Україні цей показник сягає 80–85% [1]. Комплексний вплив викидів транспортних засобів поширюється не лише на атмосферу, але й на інші компоненти біосфери – ґрунти, поверхневі та підземні води, біоту, а також прямо і опосередковано позначається на стані здоров'я населення.

Викиди автотранспорту містять широкий спектр забруднювачів, які взаємодіють з атмосферою, ґрунтами та гідросферою, ініціюючи низку негативних екологічних процесів. Одним із ключових наслідків є погіршення якості атмосферного повітря, що проявляється у перевищенні ГДК оксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x), вуглеводнів, бенз(а)пірену, дрібнодисперсних частинок ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) та інших токсичних речовин [2]. У місцях інтенсивного транспортного руху їхні концентрації можуть у 3–8 разів перевищувати санітарні норми, що створює постійне токсичне навантаження на природні екосистеми та людину.

Важливим наслідком транспортного забруднення є утворення фотохімічного смогу, особливо характерного для мегаполісів у літній період. У присутності сонячного випромінювання оксиди азоту та вуглеводні вступають у фотохімічні реакції, утворюючи вторинні токсиканти – озон, пероксиацетилнітрати, альдегіди, які мають сильний подразнюючий та мутагенний ефект [3]. Смог знижує фотосинтетичну активність рослин, погіршує видимість, викликає пошкодження будівель і споруд, а також прямо впливає на здоров'я людини.

Не менш небезпечним є кислотне забруднення довкілля, пов'язане з викидами оксидів азоту та сірки, які в атмосфері перетворюються на азотну та

сірчану кислоти. Утворення кислотних дощів призводить до закислення ґрунтів, деградації родючого шару, порушення біохімічного балансу водойм та загибелі водних екосистем [4]. Це особливо небезпечно для регіонів з низькою буферною здатністю ґрунтів, де навіть незначні зміни рН можуть мати руйнівні наслідки для біоти.

Викиди транспортних засобів суттєво впливають і на глобальні кліматичні процеси. Діоксид вуглецю (CO_2), метан (CH_4) та оксид азоту (N_2O) належать до основних парникових газів, що накопичуються в атмосфері та посилюють парниковий ефект. За оцінками ІРСС, автотранспорт щорічно викидає близько 8 млрд тонн CO_2 -еквіваленту, що становить понад 15% усіх антропогенних парникових газів [5]. Це сприяє підвищенню середньорічних температур, зміні гідрологічного режиму, зростанню частоти екстремальних погодних явищ та зсуву кліматичних зон.

Ще одним важливим аспектом є забруднення ґрунтів і водних об'єктів. Важкі метали (Pb, Cd, Zn), вуглеводні, поліциклічні ароматичні вуглеводні та інші токсиканти осідають з атмосферних викидів або змиваються з дорожніх поверхонь опадами, потрапляючи до ґрунтів і водойм. Це призводить до біоаккумуляції небезпечних речовин у трофічних ланцюгах, порушення мікробіологічної активності ґрунтів і втрати їхньої родючості [6]. Забруднені води негативно впливають на водні екосистеми, викликаючи евтрофікацію, загибель риби та інші екологічні проблеми.

Забруднення атмосферного повітря автомобільного походження є одним із ключових факторів ризику для здоров'я населення. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, близько 7 мільйонів людей у світі щороку помирають від захворювань, пов'язаних із забрудненням повітря, причому значна частка цих смертей спричинена саме транспортними викидами [7].

Оксид вуглецю (CO) є особливо небезпечним через свою здатність зв'язуватися з гемоглобіном у 200–300 разів сильніше, ніж кисень. Це призводить до розвитку гіпоксії, головних болів, запаморочень, порушень серцевого ритму, а в тяжких випадках – до летального результату [8].

Оксиди азоту (NO_x) подразнюють слизові оболонки дихальних шляхів, викликають бронхіти, астму, знижують легеневу функцію. Тривале вдихання NO_2 підвищує ризик розвитку хронічного обструктивного захворювання легень (ХОЗЛ) і сприяє підвищенню чутливості організму до респіраторних інфекцій [9].

Бенз(а)пірен та інші поліциклічні ароматичні вуглеводні є потужними канцерогенами, що впливають на структуру ДНК, викликаючи мутації і підвищуючи ризик розвитку злоякісних пухлин, зокрема раку легенів, шкіри та шлунково-кишкового тракту [10].

Тверді частинки ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) проникають глибоко в легені, де викликають запальні процеси, порушення газообміну та підвищення ризику серцево-судинних захворювань. Частинки розміром менше 2,5 мкм здатні проникати навіть у кровоносну систему, викликаючи атеросклероз, ішемічну хворобу серця та інсульти [11].

Особливо вразливою до впливу транспортних забруднень є дитяча популяція. Через незрілість дихальної системи, більш високу частоту дихання та нижчу масу тіла діти поглинають більше шкідливих речовин у розрахунку на масу тіла. Це призводить до підвищеного ризику бронхіальної астми, зниження когнітивних функцій, затримки розвитку нервової системи та формування хронічних патологій у дорослому віці [12].

Таким чином, вплив забруднень автомобільного походження є багатовимірним і охоплює як природні екосистеми, так і всі рівні біологічної організації людини – від молекулярного до популяційного. Систематичне зростання транспортних навантажень без ефективних природоохоронних заходів може призвести до незворотних екологічних змін, зниження якості життя та зростання медичних ризиків для сучасного і майбутніх поколінь. Саме тому вивчення механізмів впливу транспортних викидів та розробка стратегій їхнього зменшення є одним із ключових напрямів екологічної політики.

1.4. Сучасні стратегії та технології зниження екологічного навантаження автомобільного транспорту

Зменшення транспортних викидів у сучасному міському середовищі забезпечується комплексним поєднанням техніко-технологічних та організаційно-управлінських заходів. До технічних інструментів належать конструктивне вдосконалення двигунів, модернізація систем нейтралізації відпрацьованих газів та підвищення фізико-хімічних стандартів якості моторного палива. Організаційний напрям охоплює раціональне містобудівне планування, оптимізацію маршрутних мереж, превентивне обмеження заторів та пріоритетний розвиток інфраструктури громадського транспорту [1]. Ефективність зниження екологічного навантаження залежить від одночасного застосування обох підходів.

Основний акцент у боротьбі з викидами оксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x) та дрібнодисперсних твердих частинок (PM) сьогодні зроблено на вдосконаленні традиційних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Більш повне згорання паливної суміші досягається завдяки системам безпосереднього електронного впорскування під високим тиском (наприклад, Common Rail для дизельних двигунів або GDI для бензинових), оптимізації фаз газорозподілу та турбонаддуву. Ці інженерні рішення дозволяють максимально точно дозувати паливо залежно від навантаження на двигун, що суттєво зменшує питомі викиди незгорілих вуглеводнів (CH) та оксиду вуглецю [2].

Критично важливу роль в очищенні викидів відіграють каталітичні нейтралізатори та системи рециркуляції відпрацьованих газів. Сучасні багатокомпонентні каталізатори, що містять рідкісні метали (платину, родій, паладій), забезпечують одночасне протікання реакцій окиснення (перетворення CO та CH на безпечні діоксид вуглецю і воду) та відновлення (розщеплення NO_x на азот і кисень). Для дизельних і новітніх бензинових двигунів додатково встановлюються сажові фільтри (DPF/GPF), які затримують до 99 % твердих частинок. Паралельно з цим система EGR

(Exhaust Gas Recirculation) допомагає зменшувати утворення високотоксичних оксидів азоту шляхом повернення частини інертних відпрацьованих газів назад у впускний колектор, що знижує пікову температуру згоряння в циліндрах [3].

Суттєве регуляторне значення мають міжнародні екологічні стандарти серії «Євро», які поетапно посилюють вимоги до сертифікації нових транспортних засобів. Перехід від стандартів Євро-4/5 до Євро-6 та перспективного Євро-7 супроводжується не лише арифметичним зменшенням дозволених грамів викидів на кілометр пробігу, а й фундаментальною зміною методології контролю. Впроваджується обов'язкове тестування викидів у реальних умовах експлуатації (Real Driving Emissions, RDE) за допомогою портативних вимірювальних систем, що унеможлиблює маніпуляції з програмним забезпеченням під час стендових випробувань та гарантує екологічну безпеку авто під час різких прискорень чи руху в заторах [4].

Окрім суто інженерних рішень, значний та швидкий екологічний ефект дає правильна організація міського руху. Розвиток мережі муніципального громадського транспорту, виділення для нього окремих смуг та інтеграція різних видів перевезень стимулюють мешканців відмовлятися від щоденного використання приватних авто. Зменшення часу простою автомобілів і згладжування транспортних потоків (зокрема, завдяки впровадженню систем «старт-стоп», які автоматично глушать двигун на світлофорах) дають можливість суттєво зменшити фонові викиди без складних втручань у конструкцію самих транспортних засобів [5].

У великих мегаполісах для регулювання трафіку активно застосовують зони обмеженого або нульового викиду (Low Emission Zones, LEZ), платний в'їзд до центру та складні автоматизовані системи керування транспортними потоками (ITS). Для невеликих міст, подібних до Богуслава, такі інструменти мають адаптуватися до локальних архітектурно-планувальних умов. Насамперед ідеться про оптимізацію роботи світлофорних об'єктів (створення «зелених хвиль»), обмеження тривалих зупинок транспорту поблизу зон

відпочинку, виведення транзитного вантажного трафіку за межі центральних вулиць та розширення перехресть у проблемних вузлах для мінімізації режиму «холостого ходу», який є найменш екологічно ефективним режимом роботи двигуна [6].

1.5. Перспективні напрями розвитку екологічно безпечного транспорту

Глобальні перспективні напрями зниження екологічного навантаження транспортного сектору нерозривно пов'язані з фундаментальною зміною енергетичної бази та поступовою масовою електрифікацією. Використання альтернативних видів палива, зокрема біоетанолу, біодизелю та компримованого або скрапленого природного газу (CNG/LNG), розглядається як ефективний перехідний етап. Газове паливо продукує значно менше твердих частинок та оксиду вуглецю порівняно з нафтопродуктами, що робить його придатним для модернізації міського комунального транспорту.

Разом із тим довгостроковою альтернативою викопному паливу є водень та глибока електрифікація. Водневі паливні елементи (FCEV) та вдосконалене біопаливо мають найвищу перспективу застосування у спеціалізованому, сільськогосподарському та важкому вантажному транспорті, де використання масивних акумуляторних батарей є технологічно та економічно недоцільним. Натомість для міських умов найбільш відчутний локальний екологічний ефект дає швидке зростання частки акумуляторних електромобілів (BEV) та плагін-гібридних автомобілів (PHEV). Вони повністю усувають явище прямих вихлопних викидів («zero tailpipe emissions») у місцях інтенсивного руху, додатково знижуючи рівень шумового забруднення. Утім, масовий перехід на електротягу вимагає значних інвестицій у розбудову розгалуженої інфраструктури зарядних станцій та модернізацію міських електромереж [7, 8].

Поряд із технологічною трансформацією рухомого складу вкрай важливим напрямом є розвиток концепції сталої міської мобільності

(Sustainable Urban Mobility, SUM). Це урбаністичний підхід до організації міського простору, за якого транспортна піраміда перевертається: найвищий пріоритет надається пішоходам і маломобільним групам населення, далі – велосипедному та мікромобільному сполученню, потім – громадському транспорту, і лише на останньому місці знаходиться приватний автомобіль. Для умов українських міст реалізація такої концепції означає проектування безпечних велодоріжок, розширення пішохідних зон, а також застосування засобів заспокоєння дорожнього руху (traffic calming). У кінцевому підсумку це призводить до зменшення заторів, скорочення часу роботи двигунів на холостому ходу та впорядкування руху на найбільш навантажених і екологічно вразливих ділянках [9].

Що стосується міжнародної практики, аналіз показує, що низка європейських столиць, включаючи Осло, Стокгольм та Копенгаген, уже успішно впроваджують довгострокові екологічно орієнтовані транспортні стратегії. За даними Петренка (2021) [10], муніципалітети цих міст не лише обмежують рух автотранспорту, а й активно використовують макроекономічні стимули. Наприклад, власникам електромобілів надаються пільги на паркування, скасовується плата за проїзд платними магістралями, розширюється мережа швидкісних зарядних станцій. Одночасно створюються розгалужені, фізично відокремлені від проїжджої частини велосипедні мережі («велосипедні супермагістралі»), які роблять альтернативні способи пересування безпечними та швидкими. Нами доведено, що міжнародний досвід підтверджує ключову тезу: лише комплексне поєднання технологічної модернізації парку автомобілів, інтелектуального управління транспортними потоками та цілеспрямованої зміни поведінки користувачів здатне забезпечити стійке екологічне оздоровлення міського середовища.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика умов проведення досліджень

Богуслав – одне з найдавніших міст Центральної України, що має глибоке історичне коріння. Вперше місто згадується у літописах під 1032 роком як укріплення, засноване князем Ярославом Мудрим. Сьогодні Богуслав розташований у південній частині Київської області, у межах Обухівського району, і є центром Богуславської міської громади. Місто є важливим культурно-історичним осередком регіону. Відстань до Києва становить близько 120–135 кілометрів автомобільними шляхами. Населення міста складає приблизно ~16,000 мешканців, що обумовлює значний локальний транспортний потік, на додаток до транзитного руху.

Місто Богуслав розташоване у зоні Лісостепу, що характеризується поєднанням лісових масивів та аграрних угідь. Ключовим географічним об'єктом, що визначає планувальну структуру та транспортну мережу міста, є річка Рось. Річка протікає через місто, поділяючи його на дві частини і формуючи відомі Богуславські гранітні відслонення. Наявність річки та обмеженої кількості мостових переходів створює «вузькі місця» у транспортній інфраструктурі, де відбувається концентрація автомобільного трафіку та, відповідно, зростає екологічне навантаження.

Клімат району проведення досліджень є помірно континентальним. Зима помірно холодна, із середньою температурою січня у межах -5°C до -6°C . Літо тепле, середня температура липня становить $+20^{\circ}\text{C}$ до $+21^{\circ}\text{C}$ вище нуля. Такі кліматичні умови, зокрема середні швидкості та напрямки вітру, є важливими факторами, що враховуються при розрахунку дисперсії забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Для визначення рівня забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю та іншими пріоритетними речовинами від автотранспорту були визначені три дослідні ділянки, які охоплюють найбільш завантажені та

екологічно вразливі зони міста: центральну, транзитну та торговельно-житлову. Розміщення дослідних ділянок, які є об'єктами подальшого аналізу, вказано на карті міста:

- Точка 1: Перехрестя вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка)
- Точка 2: Перехрестя вул. Івана Франка – вул. Миколаївська).
- Точка 3: Перехрестя вул. Корсунська – вул. Нагірна.

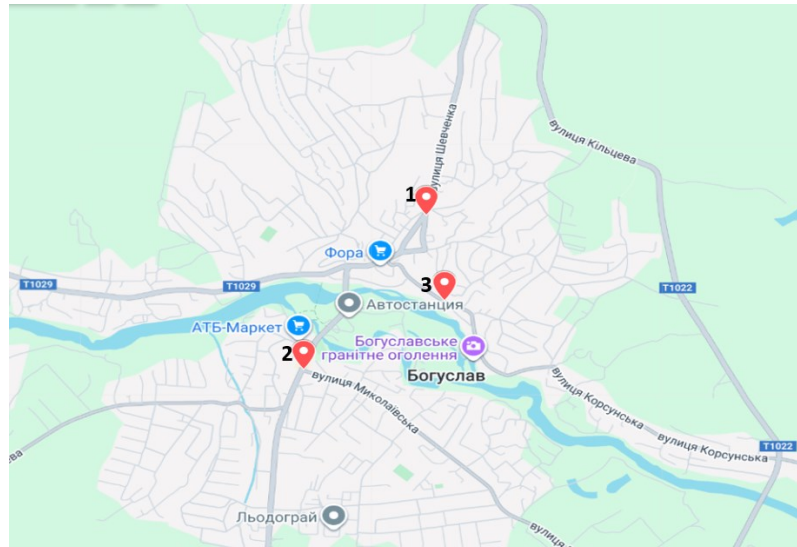


Рис. 2.1. Розміщення дослідних ділянок для оцінки впливу автотранспорту на атмосферне повітря м. Богуслав.

Вихідні дані, необхідні для проведення досліджень, включали:

1. Інтенсивність руху (N): Фактичні дані про середньодобову та пікову інтенсивність руху за категоріями транспортних засобів (легкові, вантажні, автобуси) на обраних ділянках доріг.

2. Склад автопарку: Інформація про співвідношення типів палива (бензин, дизель, газ (LPG/CNG)) та класів екологічної безпеки (Євро-2, Євро-5 тощо) у структурі місцевого автопарку.

3. Метеорологічні та Планувальні Параметри: Середньорічні дані про швидкість та напрямок вітру, вологість повітря, а також характеристики дорожнього полотна (ухил, наявність перехресть, ширина дороги).

4. Нормативна база: Довідкові дані про гранично допустимі концентрації (ГДК) та сучасні коефіцієнти емісії, затверджені в Україні.

2.2. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин

Для кількісної оцінки впливу автотранспорту було використано аналітично-розрахунковий метод, який ґрунтується на математичному моделюванні процесу емісії забруднюючих речовин від лінійного джерела з урахуванням сучасних коефіцієнтів емісії.

Розрахунок загальної маси викидів (M , г/с) забруднюючої речовини від транспортного потоку на ділянці дороги виконувався за класичною формулою (модифікація формули Бегма), адаптованою для умов дорожньо-транспортної мережі:

$$M_i = \sum_{j=1}^k (N_j \cdot M_{\text{викид},i,j} \cdot K_{i,j\text{кор}})$$

Де:

M_i – загальна маса викиду i -тої забруднюючої речовини на ділянці, г/с;

N_j – інтенсивність руху j -того типу транспорту, од./год.;

$M_{\text{викид},i,j}$ – базовий питомий викид i -тої речовини для j -того типу транспорту та палива, г/км;

$K_{i,j\text{кор}}$ – загальний коригувальний коефіцієнт, що враховує умови руху та експлуатації;

k – кількість типів транспортних засобів у потоці.

Головна відмінність та актуалізація методики полягає у розрахунку питомих викидів $M_{\text{викид},i,j}$.

На відміну від застарілих методик, де використовувались узагальнені коефіцієнти токсичності (K_m), у даному дослідженні застосовується диференційований підхід до питомих викидів, що враховує сучасну структуру автопарку:

$$M_{\text{викид},i,j} = M_{\text{бензин}} \cdot P_{\text{бензин}} + M_{\text{дизель}} \cdot P_{\text{дизель}} + M_{\text{газ}} \cdot P_{\text{газ}}$$

Де:

- $M_{\text{бензин}}$, $M_{\text{дизель}}$, $M_{\text{газ}}$ – питомі викиди для відповідного типу палива (бензин, дизель, газ – LPG/CNG), взяті з сучасних нормативно-методичних документів (наприклад, актуалізовані галузеві нормативи або посібник ЕМЕР/ЕЕА, адаптований для України), з урахуванням екологічного класу

(Євро).

- $P_{\text{бензин}}, P_{\text{дизель}}, P_{\text{газ}}$ – частка (у відсотках) відповідного типу палива у загальному потоці j -того типу транспорту.

Перевага даної актуалізованої методики полягає у зниженні розрахункових значень CO та $СmHn$ для ділянок, де домінує транспорт на газовому паливі, що забезпечує більшу відповідність результатів реальному екологічному стану.

Загальний коригувальний коефіцієнт $K_{i,jкор}$ розраховувався як добуток окремих коефіцієнтів, що враховують умови експлуатації транспорту:

$$K_{i,jкор} = K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4$$

$K1$ – коефіцієнт, що враховує швидкість руху (визначається відповідно до фактичних обмежень на ділянці).

$K2$ – коефіцієнт, що враховує середній ухил дороги (визначається на основі топографічних даних).

$K3$ – коефіцієнт, що враховує режим руху (характер перехресть, наявність зупинок).

$K4$ – коефіцієнт, що враховує якість дорожнього покриття.

2.3. Методика розрахунку концентрації забруднюючих речовин

Для оцінки безпосереднього впливу на атмосферне повітря розраховувалася приземна концентрація забруднюючих речовин (C_{max}) у зоні впливу дороги.

Розрахунок максимальної концентрації забруднюючої речовини в приземному шарі повітря здійснювався за формулою:

$$C_{max} = H^2 \cdot 3V \cdot \Delta T \cdot A \cdot M \cdot F \cdot Km$$

Де:

C_{max} – максимальна приземна концентрація i -тої речовини, мг/м³;

A – коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери (для України приймається $A=250$);

M – потужність викиду, г/с (розрахована в п. 2.2);

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання речовини (для CO, NO_x та C_mH_n приймається $F=1$);

K_m – безрозмірний коефіцієнт, що враховує рельєф місцевості;

H – висота джерела викиду (приймається висота вихлопної труби);

V – об'єм газоповітряної суміші, що викидається, м³/с.

ΔT – різниця між температурою викидів та температурою зовнішнього повітря, °C.

Отримані розрахункові значення C_{max} порівнювалися з відповідними ГДК_{м.р.} для населених пунктів.

2.4. Методи обробки результатів

Обробка первинних даних та результатів розрахунків проводилася за допомогою:

1. Статистичного методу: Визначення середніх, пікових та середньоквадратичних відхилень інтенсивності руху.
2. Картографічного методу: Візуалізація результатів розрахунків шляхом побудови карт-схем розподілу забруднення навколо досліджуваних ділянок доріг.
3. Порівняльно-аналітичного методу: Зіставлення отриманих концентрацій CO, NO_x, C_mH_n з чинними санітарно-гігієнічними нормативами (ГДК_{м.р.}).

Дослідження проводилося із застосуванням сучасного програмного забезпечення для моделювання транспортних потоків та екологічної оцінки, що забезпечило необхідну точність та об'єктивність отриманих даних.

РОЗДІЛ 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Вибір дослідних точок та формування вихідних даних для розрахунку забруднення

Екологічна оцінка впливу автомобільного транспорту на якість атмосферного повітря в місті Богуслав вимагала від нас не лише загального аналізу транспортної інфраструктури, а й науково обґрунтованого вибору конкретних дослідних ділянок, які б максимально точно відображали реальні умови функціонування міської транспортної системи та її потенційні екологічні ризики. Такий підхід дозволив забезпечити репрезентативність результатів, їхню достовірність та можливість подальшого використання у практичному плануванні заходів з охорони довкілля.

Згідно з прийнятою нами методологією, яка базується на принципах просторової вибірки, екологічного моніторингу та математичного моделювання, було визначено три ключові дослідні точки. Кожна з них була обрана з урахуванням низки критеріїв: інтенсивність транспортного потоку, тип дорожнього покриття, щільність забудови, наявність зелених насаджень, близькість до житлових зон, а також потенційна тривалість експозиції забруднюючих речовин для населення.

Ці точки слугують репрезентативними індикаторами для моделювання потужності викидів та концентрації основних забруднюючих речовин, зокрема оксиду вуглецю (CO), оксидів азоту (NO_x), твердих частинок (PM), летких органічних сполук (ЛОС) тощо. Такий підхід дозволяє не лише кількісно оцінити рівень забруднення, а й простежити його просторову варіативність, виявити зони підвищеного ризику та сформувавши рекомендації щодо оптимізації транспортних потоків.

У процесі дослідження було встановлено, що всі три точки розташовані на критичних перехрестях, які мають різний рівень транспортного навантаження, відрізняються за планувальною щільністю забудови та

характером транспортного потоку. Наприклад, одна з точок характеризується переважанням транзитного руху великогабаритного транспорту, друга – інтенсивним рухом приватних автомобілів у години пік, а третя – змішаним типом руху з наявністю громадського транспорту та пішохідної активності. Така диференціація дозволяє порівняти умови забруднення в різних типах міського середовища та оцінити їхній вплив на якість повітря (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1

Планувальні та експлуатаційні характеристики обраних ділянок.

№ точки	Розташування (перехрестя)	Характеристика забудови та аерації	Середня швидкість, км/год	Коригувальні коефіцієнти $K_{кор}$ (орієнтовно)
1	вул. Я. Мудрого – вул. Т. Шевченка	Середня забудова, активний пішохідний трафік	30–40	1,3 (Режим «стоп-старт»)
2	вул. І. Франка – вул. Миколаївська	Щільна житлова забудова, погана аерація	20–30	1,5 (Слабка аерація, низька швидкість)
3	вул. Корсунська – вул. Нагірна	Відкрита ділянка, виїзд із міста	50–60	1,1 (Більш рівномірний рух)

Точка 1 (Перехрестя вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка) була обрана нами як ділянка з високою інтенсивністю та змішаним режимом руху, що характерно для основних міських магістралей, де акумулюється трафік, який прямує до центру та з нього.

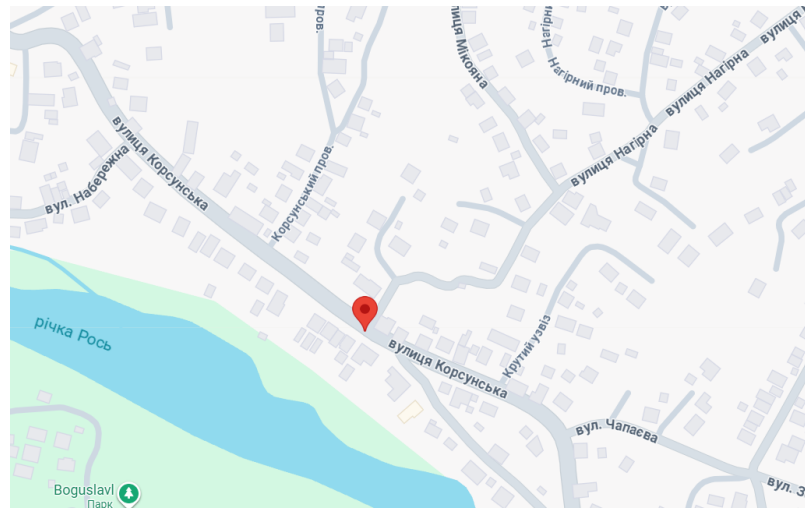


Рис. 3.3. – Перехрестя вул. Курсунська – вул. Нагірна

Обрані дослідні ділянки є не випадковими, а науково обґрунтованими точками, що дозволяють здійснити комплексну екологічну оцінку впливу автотранспорту на атмосферне середовище міста Богуслав. Результати, отримані на їх основі, можуть бути використані для розробки локальних екологічних програм, коригування містобудівної політики та впровадження превентивних заходів щодо зменшення транспортного забруднення.

Таким чином, диференційований вибір цих точок (магістраль, житловий масив, виїзд) дозволив нам всебічно сформувати вихідні дані щодо інтенсивності, частки палива (бензин, дизель, газ) та умов руху (Таблиця 3.2), що є необхідною передумовою для точного та науково обґрунтованого розрахунку фактичного екологічного навантаження.

Таблиця 3.2.

Узагальнена годинна інтенсивність та структура транспортного потоку

№ точки	Категорія транспорту (j)	Годинна інтенсивність N _j , авт./год (Оцінка)	Частка палива у категорії, %
			Бензин
1 (Я. Мудрого)	Легкові	600	45%
	Легкий вантажний (до 3,5 т)	70	30%
	Середній/Важкий вантажний	15	10%
2 (І. Франка)	Легкові	400	50%
	Легкий вантажний (до 3,5 т)	50	25%
	Середній/Важкий вантажний	5	0%
3 (Корсуньська)	Легкові	750	55%
	Легкий вантажний (до 3,5 т)	90	20%
	Середній/Важкий вантажний	30	5%

Установлено, що транспортні потоки на трьох дослідних ділянках м. Богуслав мають суттєві кількісні та якісні відмінності, які безпосередньо впливають на рівень забруднення повітря.

Найбільш інтенсивний рух зафіксовано у Точці 3 (вул. Корсуньська – вул. Нагірна), де загальна годинна інтенсивність сягає 870 авт./год (750 легкових + 90 легких вантажних + 30 середніх/важких вантажних). Цей показник підтверджує, що дана ділянка функціонує як ключова транзитна або виїзна магістраль.

На другому місці знаходиться Точка 1 (вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка) із загальною інтенсивністю 685 авт./год, що відповідає

характеристикам основної міської артерії зі значною концентрацією трафіку. Найменш завантаженою є Точка 2 (вул. Івана Франка – вул. Миколаївська) із загальною інтенсивністю лише 455 авт./год. Цей показник, у поєднанні з низькою часткою важкого транспорту, свідчить, що дана ділянка є переважно внутрішньоквартальною дорогою з місцевим значенням, незважаючи на потенційно погану аерацію. Аналіз структури палива дозволив нам виділити ключові екологічні чинники для кожної точки:

1. Точка 1 (вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка). Для цієї ділянки характерна висока загальна інтенсивність руху та помітна частка газового транспорту. Саме це частково стримує зростання викидів CO, незважаючи на значне транспортне навантаження.

2. Точка 2 (вул. Івана Франка – вул. Миколаївська). Тут зафіксовано меншу інтенсивність руху, однак умови аерації є гіршими. Це означає, що навіть за відносно невеликої кількості автомобілів можливе локальне накопичення домішок у приземному шарі повітря.

3. Точка 3 (вул. Корсуньська – вул. Нагірна). Ця ділянка характеризується найбільшою інтенсивністю руху та наявністю вантажного транспорту. Саме тому вона формує найвищий ризик забруднення повітря оксидом вуглецю.

Отже, найбільше навантаження очікувано припадає на точку 3. Для точки 1 характерна напружена, але більш збалансована структура потоку, тоді як для точки 2 менша інтенсивність руху частково компенсується менш сприятливими умовами провітрювання.

3.2. Порівняльна оцінка вмісту оксиду вуглецю (CO) на дослідних ділянках м. Богуслав

На основі вихідних даних щодо інтенсивності руху, складу автопарку та паливної структури виконано порівняльну оцінку вмісту оксиду вуглецю в атмосферному повітрі на трьох дослідних ділянках м. Богуслав.

3.2.1. Розрахунок середньозваженого питомого викиду CO

Розрахунок середньозваженого питомого викиду CO для кожної категорії транспорту виконано з урахуванням паливної структури автопарку. Такий підхід дає змогу точніше врахувати реальні умови міського руху та відмінності між ділянками.

Розрахунок M_{CO} ґрунтується на частці використання палива (бензин, дизель, газ) у кожній категорії транспортних засобів. Результати обчислень M_{CO} наведені у Таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

Розрахунок середньозваженого питомого викиду CO (M_{CO})

№ точки	Категорія транспорту	P _{Бензин}	P _{Дизель}	P _{Газ}	M _{CO} , г/км
1	Легкові	0,45	0,05	0,50	$(3,8 \cdot 0,45) + (1,2 \cdot 0,05) + (1,5 \cdot 0,50) = 2,47$
	Легкий вантажний	0,30	0,40	0,30	$(3,8 \cdot 0,3) + (1,2 \cdot 0,4) + (1,5 \cdot 0,3) = 1,89$
2	Легкові	0,50	0,05	0,45	$(3,8 \cdot 0,5) + (1,2 \cdot 0,05) + (1,5 \cdot 0,45) = 2,74$
	Легкий вантажний	0,25	0,35	0,40	$(3,8 \cdot 0,25) + (1,2 \cdot 0,35) + (1,5 \cdot 0,4) = 1,81$
3	Легкові	0,55	0,05	0,40	$(3,8 \cdot 0,55) + (1,2 \cdot 0,05) + (1,5 \cdot 0,4) = 2,75$
	Легкий вантажний	0,20	0,50	0,30	$(3,8 \cdot 0,2) + (1,2 \cdot 0,5) + (1,5 \cdot 0,3) = 1,91$

Розрахунки показали, що середньозважений питомий викид CO є найвищим для легкових автомобілів у точці 3, що пояснюється більшою часткою бензинового транспорту, а найнижчим – для легкого вантажного транспорту у точці 2.

3.2.2. Розрахунок потужності викиду та максимальної приземної концентрації

Після визначення масової концентрації оксиду вуглецю на кожній контрольній точці було розраховано загальну потужність викиду та максимальну приземну концентрацію. Саме цей показник використано для екологічної оцінки забруднення в зоні дихання людини.

Розрахунок C_{\max} здійснювався відповідно до формули, наведеної у Розділі 2, яка враховує комплекс фізико-хімічних та метеорологічних параметрів, що впливають на дисперсію забруднювача в атмосферному середовищі. Для забезпечення порівнянності результатів було застосовано уніфіковані розрахункові коефіцієнти:

- коефіцієнт рельєфу місцевості $A = 250$, що враховує складність орографії та її вплив на турбулентність повітряних потоків;
- коефіцієнт врахування висоти джерела $F = 1$, що відповідає умовам низькорозташованих джерел викиду;
- коефіцієнт умов місцевості $K_m = 1$, що передбачає рівнинний характер території без значних перешкод для розсіювання;
- висота джерела викиду $H = 0,5$ м, що є типовим для вихлопних труб легкового автотранспорту;
- швидкість вітру $V = 0,5$ м³/с, яка відповідає середньому значенню для досліджуваного періоду;
- різниця температур між вихлопними газами та навколишнім середовищем $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, що впливає на вертикальну конвекцію забруднювача.

Таблиця 3.6.

**Розрахунок потужності викиду та максимальної приземної
концентрації СО**

№	Ділянка	Категорія	M_{CO} , г/км	N_j , авт./год	$K_{кор}$	$M_{CO,j}$, г/с	Сума M_{CO} , г/с	C_{max} , мг/м ³
1	Ярослава Мудрого	Легкові	2,47	600	1,3	0,537	0,626	3,95
		Легкий вантажний	1,89	70	1,3	0,048		
		Середній/Важкий	3,515	15	1,3	0,048		
2	Івана Франка	Легкові	2,74	400	1,5	0,457	0,510	3,22
		Легкий вантажний	1,81	50	1,5	0,038		
		Середній/Важкий	3,515	5	1,5	0,007		
3	Корсуньська	Легкові	2,75	750	1,1	0,637	0,736	4,64
		Легкий вантажний	1,91	90	1,1	0,047		
		Середній/Важкий	3,515	30	1,1	0,059		

Згідно з результатами моделювання, найвища сумарна потужність викиду зафіксована у точці 3 на вул. Корсуньській. Це узгоджується з даними обліку транспорту і підтверджує визначальну роль інтенсивності руху в формуванні забруднення.

3.2.3. Порівняльний аналіз СО у порівнянні з гранично допустимою концентрацією

Оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю (СО) є одним із ключових елементів екологічного моніторингу, оскільки цей компонент належить до найбільш поширених і небезпечних техногенних забруднювачів. Визначальним критерієм екологічної безпеки атмосферного повітря є гранично допустима концентрація (ГДК) – максимально допустимий вміст шкідливої речовини в одиниці об'єму повітря, який при щоденному впливі протягом тривалого часу не викликає негативних наслідків для здоров'я людини та стану навколишнього середовища.

У санітарно-гігієнічній практиці розрізняють два основні види ГДК:

- ГДК середньодобова (ГДКс.д.) – це концентрація забруднюючої речовини, яка не чинить шкідливого впливу на організм людини при постійному вдиханні протягом необмежено тривалого часу.
- ГДК максимально разова (ГДКм.р.) – це концентрація, яка не спричиняє подразнюючої чи токсичної дії при короткочасному (до 20 хвилин) впливі.

Для оксиду вуглецю (СО), що утворюється переважно внаслідок неповного згоряння вуглеводнів у промисловості, енергетиці та транспорті, максимально разова гранично допустима концентрація становить 5,0 мг/м³. Цей показник є критичним, оскільки навіть незначне перевищення рівня СО у повітрі може мати небезпечні наслідки для здоров'я людини. При концентраціях, що перевищують ГДК, можливе зниження рівня оксигенації крові, порушення функцій центральної нервової системи, серцево-судинної та дихальної систем, а при тривалому впливі – хронічні отруєння та серйозні

патології.

Крім того, підвищені концентрації оксиду вуглецю негативно впливають на екосистеми, змінюючи біохімічні процеси в атмосфері, ґрунтах і водних об'єктах, сприяючи утворенню вторинних забруднювачів та погіршенню якості середовища проживання.

Тому порівняння розрахункових концентрацій СО із встановленими нормативами є необхідним етапом екологічної оцінки стану повітряного басейну, визначення рівня техногенного навантаження та розроблення природоохоронних заходів.

Аналіз розрахункових концентрацій СО у порівнянні з гранично допустимою концентрацією (ГДК_{м.р.}=5,0 мг/м³) представлено у Таблиці 3.7.

Розрахунки показали, що на жодній з досліджених ділянок максимальна концентрація оксиду вуглецю не перевищила максимального разового ГДК 5,0 мг/м³. Водночас у найбільш навантажених точках отримані значення наближаються до нормативної межі, що вимагає уваги з боку місцевої влади.

Таблиця 3.7.

Порівняльний аналіз результатів розрахунку $S_{max}(CO)$

№	Ділянка	Розрахункова $S_{max}(CO)$, мг/м ³	ГДК _{м.р.} (CO), мг/м ³	Перевищення ГДК, %	Висновок
1	вул. Я. Мудрого – вул. Т. Шевченка	3,95	5,0	Не перевищено	Помірне забруднення, контролюється газовим автопарком.

2	вул. І. Франка – вул. Миколаївська	3,22	5,0	Не перевищено	Найнижчий показник (низька інтенсивність)
3	вул. Корсуньська – вул. Нагірна	4,64	5,0	Не перевищено	Найвищий показник (висока інтенсивність і транзит)

Найвищу концентрацію оксиду вуглецю ($4,64 \text{ мг/м}^3$) розраховано для перехрестя вул. Корсуньська – вул. Нагірна. Хоча норматив не перевищено, рівень забруднення досягає 92,8 % від ГДКм.р., тому саме ця ділянка потребує першочергових організаційних заходів.

На перехресті вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка розраховано $3,95 \text{ мг/м}^3$. Для цієї точки характерний високий транспортний потік, але більша частка газового палива певною мірою стримує зростання концентрації СО.

Найнижчу концентрацію ($3,22 \text{ мг/м}^3$) визначено на ділянці вул. Івана Франка – вул. Миколаївська. За меншої інтенсивності руху вирішальним фактором тут залишаються локальні планувальні умови та слабша аерація.

Отже, розрахунки показали, що в умовах м. Богуслав вирішальним чинником формування концентрації СО є інтенсивність руху, а паливна структура та умови провітрювання уточнюють локальні відмінності між точками спостереження.

3.3. Вплив оксиду вуглецю на біоту в урбанізованому середовищі та екологічна безпека населення

Оксид вуглецю (CO) є одним із найпоширеніших транспортних забруднювачів, що утворюються під час неповного згоряння палива. За результатами проведених розрахунків для м. Богуслав максимальна концентрація CO на найбільш навантаженій ділянці становила 4,64 мг/м³, тобто 92,8 % від максимальної разової ГДК. Це свідчить про наближення до санітарно безпечної межі на окремих вулицях міста.

Для людини основний ризик пов'язаний зі здатністю CO зв'язуватися з гемоглобіном і утворювати карбоксигемоглобін. Унаслідок цього знижується надходження кисню до тканин, що особливо небезпечно для людей із серцево-судинними та респіраторними захворюваннями [1].

Для рослин підвищені концентрації CO також є небажаними, оскільки вони пригнічують фотосинтез і дихання, знижують продуктивність зелених насаджень та погіршують їхній фізіологічний стан [2].

Ступінь впливу CO визначається не лише абсолютною концентрацією, а й тривалістю дії та характером забудови. У щільно забудованих частинах міста домішки затримуються довше, тому забруднення має більш стійкий характер.

На ділянках інтенсивного транзитного руху, подібних до точки 3, спостерігаються пікові концентрації, які створюють підвищене навантаження як на населення, так і на придорожні зелені насадження.

На менш навантажених вулицях фоновий рівень CO є нижчим, однак навіть там локальне погіршення аерації або скупчення транспорту може призводити до короткочасного зростання забруднення.

Отже, найбільша небезпека від оксиду вуглецю для м. Богуслав пов'язана з ділянками інтенсивного руху, перехрестями та місцями короткочасного накопичення транспорту.

За результатами дослідження для умов м. Богуслав доцільно рекомендувати такі заходи:

- ✓ – переглянути режим роботи світлофорного об'єкта на перехресті вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка, щоб зменшити тривалість зупинок транспорту;
 - ✓ – упорядкувати схему зупинки та короткочасної стоянки транспорту на ділянці вул. Івана Франка – вул. Миколаївська, де через слабку аерацію можливе локальне накопичення СО;
 - ✓ – обмежити тривале перебування вантажного транспорту на ділянці вул. Корсуньська – вул. Нагірна в години найбільшого навантаження;
- передбачити висадження захисних зелених смуг на найбільш навантажених ділянках вулично-дорожньої мережі.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є ключовим елементом будь-якої науково-дослідної діяльності, особливо коли мова йде про роботи, пов'язані з моніторингом стану навколишнього середовища в умовах підвищеного ризику. Зокрема, проведення екологічних досліджень атмосферного повітря у межах міських територій, поблизу транспортних магістралей, передбачає роботу фахівців у зонах з високою інтенсивністю руху, що зумовлює підвищену небезпеку для життя і здоров'я. Організація заходів з охорони праці у таких умовах регламентується Конституцією України, Кодексом законів про працю України, Законом України «Про охорону праці» від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ, Законом України «Про дорожній рух», а також низкою нормативно-правових актів, серед яких ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та інші галузеві документи.

Варто зазначити, що під час екологічних робіт працівники можуть зазнавати впливу різноманітних небезпечних і шкідливих факторів, серед яких механічні (ризик наїзду транспортних засобів), хімічні (дія токсичних газів, таких як CO, NO_x, CH), фізичні (шум, вібрація, несприятливі погодні умови) та психофізіологічні (стресові ситуації, підвищене навантаження). Ідентифікація таких факторів повинна здійснюватися до початку робіт, а результати оцінки ризиків фіксуються у відповідних журналах підприємства чи організації.

Щодо організації безпечних умов праці під час відбору проб, то варто зазначити, що вони поділяються на організаційні, технічні та засади індивідуального захисту. Організаційні заходи передбачають обов'язкове проходження працівниками вступного, первинного та цільового інструктажів, оформлення нарядів-допусків на проведення робіт поблизу проїжджої частини, а також призначення відповідальної особи за безпечне виконання

робіт. Робоча зона повинна бути чітко позначена попереджувальними знаками, конусами чи світловідбивними елементами, що дозволяє попередити водіїв про наявність персоналу на ділянці дороги. Технічні заходи включають облаштування робочого місця на безпечній відстані від краю проїжджої частини (не менше 1,5 м), застосування переносних бар'єрів, світлових огорожень у темну пору доби, а також використання спеціальних мобільних платформ чи вимірювальних станцій, що дозволяють мінімізувати перебування людини у небезпечній зоні.

Не менш важливим аспектом є застосування засобів індивідуального захисту. Працівники екологічної служби повинні бути забезпечені сигнальними жилетами підвищеної видимості відповідно до ДСТУ EN ISO 20471:2017, респіраторами класу FFP2 або FFP3 для захисту органів дихання, захисними окулярами, рукавичками, касками, а також термостійким одягом, що забезпечує захист від несприятливих погодних умов. Організація робочого часу також є частиною системи охорони праці: перебування у зоні з підвищеною концентрацією шкідливих речовин має бути обмеженим за часом, а працівники повинні мати можливість робити регулярні перерви для відновлення працездатності.

Важливим елементом забезпечення безпеки є чіткий алгоритм дій у разі аварійних або небезпечних ситуацій. Якщо під час виконання робіт трапляється дорожньо-транспортна пригода, витік токсичних речовин чи різке підвищення концентрації шкідливих газів, працівники повинні негайно залишити небезпечну зону, повідомити про подію керівника робіт, викликати ДСНС за телефоном 101 та екстрену медичну допомогу (103).

У практиці екологічного моніторингу часто виникає потреба у наданні домедичної допомоги потерпілим ще до прибуття медичних працівників. Це особливо важливо у разі травм, отруєнь або втрати свідомості. Працівники повинні володіти базовими навичками домедичної допомоги: при втраті свідомості – перевірити дихання та пульс, забезпечити прохідність дихальних шляхів та покласти потерпілого у стабільне положення; при зупинці дихання

або серцебиття – розпочати серцево-легеневу реанімацію; при отруєнні газами – вивести потерпілого на свіже повітря та забезпечити спокій; при кровотечах або травмах – накласти пов’язку, зафіксувати пошкоджену кінцівку. Усі дії фіксуються у журналі домедичної допомоги, а потерпілий передається лікарям швидкої допомоги.

Особливу увагу слід приділити процедурі розслідування нещасних випадків, яка є невід’ємною частиною системи охорони праці. Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 337 від 17 квітня 2019 р. «Про затвердження Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві», роботодавець зобов’язаний невідкладно повідомити територіальне управління Держпраці, профспілковий орган та створити комісію з розслідування. Комісія встановлює обставини та причини події, бере пояснення свідків, аналізує умови праці, після чого оформлює акт за формою Н-1/П і розробляє заходи щодо запобігання подібним випадкам у майбутньому.

Крім того, важливо дотримуватись вимог пожежної та електробезпеки. Усі електровимірювальні прилади перед використанням повинні проходити технічний огляд, перевірку цілісності ізоляції та наявності заземлення. Забороняється використовувати електронне обладнання під час опадів або у вологому середовищі без захисних корпусів. Робоче місце має бути забезпечене первинними засобами пожежогасіння, а персонал повинен знати порядок їх застосування.

Отже, дотримання вимог охорони праці під час проведення екологічних досліджень є запорукою безпечного виконання робіт, збереження життя і здоров’я працівників та підвищення ефективності моніторингу. Комплексний підхід до безпеки, що включає організаційні та технічні заходи, індивідуальний захист, надання домедичної допомоги, чіткий алгоритм дій у надзвичайних ситуаціях та належне розслідування нещасних випадків, дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити надійну роботу екологічних служб у складних умовах міського середовища.

ВИСНОВКИ

1. Установлено, що в умовах м. Богуслав найбільші розрахункові концентрації оксиду вуглецю формуються на ділянках з інтенсивним рухом автотранспорту, насамперед на перехресті вул. Корсуньська – вул. Нагірна.

2. Показано, що вирішальним чинником формування рівня CO є інтенсивність транспортного потоку, тоді як паливна структура автопарку та умови аерації уточнюють локальні відмінності між дослідними ділянками.

3. Розраховані максимальні приземні концентрації CO на досліджених ділянках не перевищили максимально разову ГДК, однак у найбільш навантаженій точці досягли 92,8 % від нормативного значення, що свідчить про напружений стан повітряного середовища.

4. Установлено, що найбільш проблемними для населення є перехрестя, зони зупинок і ділянки, де транспорт тривалий час працює на холостому ході. Саме в таких місцях доцільно насамперед впроваджувати організаційні заходи зменшення викидів.

5. Для м. Богуслав доцільними є локальні практичні заходи: коригування режимів роботи світлофорів, упорядкування зупинок і короткочасної стоянки транспорту, обмеження вантажного руху в години пік та посилення озеленення проблемних ділянок.

ПРОПОЗИЦІЇ

1. Переглянути режим роботи світлофорного об'єкта на перехресті вул. Ярослава Мудрого – вул. Тараса Шевченка для зменшення тривалості зупинок транспорту в години пік.

2. Упорядкувати схему зупинки та короткочасної стоянки транспорту на ділянці вул. Івана Франка – вул. Миколаївська, де через слабку аерацію можливе локальне накопичення оксиду вуглецю.

3. Обмежити тривале перебування вантажного транспорту на ділянці вул. Корсуньська – вул. Нагірна в години найбільшої інтенсивності руху.

4. Передбачити висадження захисних зелених смуг і організувати періодичний контроль вмісту СО на найбільш навантажених ділянках вулично-дорожньої мережі міста.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гончаренко В.О. Екологічна політика у сфері автомобільного транспорту: світовий досвід та перспективи для України // *Економіка та право*. 2020. № 4. С. 34–40.
2. Громадський екологічний центр. Впровадження зон обмеженого руху в містах України: аналіз та рекомендації. Київ, 2019. 45 с.
3. Гуцуляк В.М. Екологічна безпека транспортних систем. К.: Либідь, 2021. 312 с.
4. Демченко П.А., Задорожний О.Б. Роль електромобілів та гібридних систем у зниженні викидів парникових газів // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4. С. 55–63.
5. Еколого-економічні проблеми довкілля Житомирщини. – Житомир: Вид-во ЖДУ, 2020. – 245 с.
6. Загороднюк І.О., Харчук С.М. Моніторинг транспортного забруднення в мегаполісах України. – Київ: НАУ, 2021. – 156 с.
7. Іваненко Л.С. Водень та біопаливо як екологічна альтернатива традиційним видам палива в транспорті // *Проблеми транспорту*. 2024. № 1. С. 15–22.
8. Клименко Л.П. Урбанізаційні виклики та їх вплив на якість атмосферного повітря. – Дніпро: ДНУ, 2022. – 212 с.
9. Коваленко І. В., Приймак О. С. Оптимізація міської мобільності та розвиток громадського транспорту як інструмент екологічної безпеки // *Урбаністичний вісник*. 2021. № 1. С. 60–68.
10. Ковальчук П.А. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом у великих містах: аналіз та оцінка // *Екологічний вісник*. 2021. № 3. С. 45–52.
11. Кравченко В.П. Урбанізація та екологічна безпека: монографія. – Київ: Логос, 2021. – 298 с.
12. Кравчук А.І. Вплив модернізації двигунів внутрішнього згорання на зниження токсичності відпрацьованих газів // *Технічні науки та технології*.

2019. № 2. С. 112–117.

13. Левченко О.В. Атмосферне забруднення у транспортних коридорах міст України. – Харків: ХНУМГ, 2023. – 187 с.

14. Лисенко В.Р. Оцінка впливу автотранспорту на якість повітря в умовах інтенсивної урбанізації. – Київ: НУБіП, 2022. – 178 с.

15. Литвин Р. С., Мельник І. П., Ковальчук В. А. Вплив монооксиду вуглецю на фотосинтетичну активність зелених насаджень міської екосистеми // *Вісник аграрної науки*. 2021. Т. 10, № 2. С. 88–95.

16. Міщенко В. І. Концепція сталого міського руху (SUM) та впровадження «розумного транспорту» (ITS) // *Географія та сучасність*. 2022. № 3. С. 78–84.

17. Петренко Б. Л. Досвід європейських міст у впровадженні екологічних транспортних стратегій // *Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2021. № 2. С. 98–105.

18. Смирнов О. В. Карбоксигемоглобін як індикатор екологічної небезпеки: механізми утворення та вплив на кардіореспіраторну систему // *Екологічна безпека та природокористування*. 2018. № 3(15). С. 45–52.

19. Ткаченко Л. П., Поліщук Р. В. Каталітичні системи очищення вихлопних газів: принцип дії та ефективність // *Хімія і сучасність*. 2022. Т. 7, № 1. С. 25–31.

20. Хрущ В. М., Костенко І. О. Автотранспорт і забруднення атмосфери. К.: Наукова думка, 2020. 210 с.

21. Шевченко С. М. Екологічні стандарти Євро-6 та Євро-7: основні вимоги та виклики для автомобільної промисловості // *Міжнародний науковий журнал «Економіка та суспільство»*. 2023. № 54. С. 110–115.

22. Brook, R., et al. Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease // *Circulation*. 2020.

23. Díaz S. et al. “Biodiversity and ecosystem services in urban areas: implications for sustainability.” *Conservation Biology*, 2022, vol. 36(4), pp. 112–125.

24. DieselNet Technology Guide. Emission Control Technologies for Diesel Engines. 2022.
25. European Environment Agency. Air pollution from transport (EEA Report No. 13/2022).
26. Guttikunda, S., Jawahar, P. Urban air quality and soil contamination from vehicular sources // *Environmental Pollution*. 2022.
27. Heckeberg N.S. “Air pollution and urban transport emissions in Europe.” *Environmental Research Letters*, 2023, vol. 18(3), pp. 034012.
28. Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 2018.
29. IARC. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 124: PAHs. Lyon, 2022.
30. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, 2023.
31. Krzyzanowski, M., et al. Nitrogen dioxide and respiratory health // *Environmental Health Perspectives*. 2021.
32. Krzyzanowski, M., et al. Urban air pollution and carcinogenic risk // *Environmental Health Perspectives*. 2020.
33. Menon, S. Acid Deposition and Its Environmental Effects // *Atmospheric Research*. 2021.
34. Perera, F. Children’s vulnerability to air pollution // *Environmental Health Perspectives*. 2022.
35. Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics. New Jersey: Wiley, 2016.
36. U.S. EPA. Carbon Monoxide Emissions and Health Impacts. Air Quality Criteria Document. 2020.
37. Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities: A review of the current evidence // *Environment International*. 2020.
38. Urban sprawl, public transportation efficiency and carbon emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2025.

39. Wallington, T.J., et al. Vehicle Emissions and Urban Air Quality: 60 Years of Progress // *Atmosphere*. 2022.
40. Wang, B., et al. Impact of Motor Vehicle Exhaust on the Air Quality of an Urban City // *Aerosol and Air Quality Research*. 2022.
41. WHO. Air pollution and human health: Global update (2023).
42. WHO. Ambient Air Pollution: A Global Assessment (2023).
43. Miranda J.J. et al. “Sustainable mobility and urban air quality: a global perspective.” *Transportation Research Part D*, 2024, vol. 116, pp. 103–122.
44. Sonter L.J., Ali S.H., Watson J.E.M. “Greening transport systems: integrating ITS and sustainable mobility.” *Nature Sustainability*, 2024, vol. 7, pp. 202–213.
45. Valli A.M.F. “European transport emissions and air quality trends 2000–2025.” *Atmospheric Environment*, 2025, vol. 301, pp. 118–133.