

С.Е. Лифенко, Д.П. Понкратов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків

ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ ОЦІНКИ СТАЛОСТІ МІСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

У статті запропоновано підхід щодо оцінки екологічної ефективності міської транспортної системи в контексті забезпечення сталості її функціонування, що ґрунтується на адаптації існуючої методики оцінки викидів забруднюючих речовин у відпрацьованих газах автомобілів до проведення мережного розрахунку.

Ключові слова: екологічна оцінка, викиди забруднюючих речовин, сталий розвиток транспортної системи, вид палива, транспортне моделювання.

Постановка проблеми

Проблема забруднення повітря відпрацьованими газами автомобільного транспорту є однією з найважливіших екологічних і соціально-економічних загроз сучасності. Зростання кількості транспортних засобів [1] призводить до підвищеного рівня забруднення атмосфери, що особливо відчутно у значних та найзначніших містах, де щільність транспортних потоків значно перевищує показники приміських районів. Це спричиняє погіршення якості повітря, негативно впливає на здоров'я населення та екосистеми, а також загострює проблему зміни клімату.

Одним із пріоритетних напрямків вирішення цієї проблеми є застосування концепції сталого розвитку транспортної системи. Згідно до зазначеної концепції транспортні проблеми мають вирішуватись «тут та зараз» не перекладаючи відповідальність на майбутні покоління [2]. Сталість є комплексною властивістю, що формується внаслідок забезпечення сукупної ефективності функціонування транспортної системи виходячи з трьох аспектів: соціального, економічного та екологічного. Екологічний аспект сталості полягає у мінімізації негативного впливу транспорту на навколишнє середовище. До пріоритетних напрямів підвищення екологічної ефективності функціонування міської транспортної системи відносять такі: удосконалення конструкції транспортних засобів з позиції паливної економічності та екологічності, перехід на альтернативні джерела енергії, розповсюдження активних способів пересувань тощо.

Під час оцінювання заходів з підвищення екологічної ефективності функціонування певної транспортної системи має бути враховано низку чинників, що характеризують специфічні особливості функціонування транспортної системи кожного

міста. До таких чинників слід віднести такі: склад транспортного потоку; розподіл структури парку транспортних засобів за видом палива, що споживається; характеристики розподілу пересувань за способами їх реалізації; погодно-кліматичні умови; технічний стан транспортних засобів тощо. Урахування зазначених чинників дасть змогу підвищити точність та достовірність результатів оцінки впливу транспорту на навколишнє середовище, а отже більш обґрунтовано підійти до встановлення пріоритетних напрямків забезпечення сталості міської транспортної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автомобільний транспорт є одним з головних джерел викидів шкідливих речовин, шумового та теплового забруднення. Транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння виділяють значну кількість різних, токсичних речовин (вуглекислий газ (CO_2), оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO) та інші), які негативно впливають на здоров'я населення та призводять до зміни клімату. Незадовільна якість повітря призводить до розвитку серцево-судинних і респіраторних захворювань, раку бронхів, трахеї і легень, які в багатьох випадків є основними причинами смертності населення [3, 4]. Наслідком зміни клімату є глобальне потепління, яке має прямий вплив не тільки на здоров'я людей та біосферу землі, а на саму роботу автомобільного транспорту. Так, наприклад, зростання температури повітря призводить до необхідності у тривалому кондиціонуванні салонів транспортних засобів, результатом якого є підвищення споживання палива [5]. Така тенденція пов'язана зі зростанням середньорічної температури, що вже спостерігається на різних континентах світу. За даними звіту [6], температура на поверхні Землі поступово

підвищується. У разі відсутності ефективних заходів зі зниження викидів, у період з 2081 по 2100 рік середня температура, порівняно з 1850–1900 роками, може зрости на 3,3–5,7 °C. Водночас, за умови зменшення рівня викидів CO₂, підвищення становитиме 1,0–1,8 °C.

Впровадження концепції сталого розвитку є дієвим підходом до зниження негативного впливу автомобільного транспорту. Вона спрямована на розвиток транспортної системи, яка повинна забезпечувати екологічну безпеку, економічну доцільність і соціальну доступність. Основна увага в цій концепції приділяється розвитку міської мобільності з використанням більш стійких способів пересувань, що є більш екологічно та соціально ефективними порівняно з моторизованим автомобільним транспортом [2].

Існують різні підходи, які можуть бути застосовані в рамках цієї концепції. Одним із напрямків є поширення використання населенням транспортних засобів з електричними двигунами або встановлення додаткового обладнання, що забезпечить використання альтернативних видів палива двигунами внутрішнього згоряння. Крім того такий підхід має розповсюджуватись на усі види автомобільного транспорту, зокрема громадський та вантажний. За даними Європейської агенції з навколишнього середовища [7] в 2023 році в Європі було зареєстровано 10,7 млн. нових легкових автомобілів, чверть з яких були обладнані електричними двигунами. Водночас в цьому ж році було зареєстровано 1,2 млн. вантажних автомобілів з яких частка електричних склала 8 %.

Перехід на використання електричних автобусів сприяє зниженню рівня шкідливих викидів, зменшенню шумового забруднення та підвищенню енергоефективності громадського транспорту [8, 9].

Для заохочення використання транспортних засобів з електричними двигунами можуть бути застосовані додаткові стимули до яких слід віднести такі [10]: впровадження податкових пільг, надання можливості безкоштовної парковки, влаштування безкоштовних зарядних станцій, надання можливості проїзду смугами руху громадського транспорту електричними індивідуальними автомобілями, надання доступу до зон нульових викидів.

Водночас, хоча електричний транспорт не здійснює прямих викидів забруднюючих речовин під час експлуатації, його вплив на довкілля зумовлений опосередкованими викидами, що виникають у процесі виробництва електроенергії, виготовлення та утилізації акумуляторних батарей, а також інших стадіях життєвого циклу транспортного засобу [11, 12].

Не менш важливим кроком у зменшенні викидів є оновлення автомобільного парку на підставі більш

високих екологічних стандартів, зокрема Євро-6, що дасть змогу скоротити викиди оксидів азоту (NO_x) [13]. Крім того, розвиток міського пасажирського транспорту [14, 15], велосипедної інфраструктури [16] та пішохідних зон [17] слід розглядати як дієві заходи, що сприяють просуванню екологічно чистої мобільності, зменшенню залежності від викопних енергоносіїв та покращенню якості повітря внаслідок зменшення користування індивідуальними автомобілями. Наприклад, згідно з результатами опитування серед користувачів індивідуального транспорту (легкових автомобілів та мотоциклів) у місті Каджанг (Малайзія), впровадження системи швидкісного автобусного сполучення (*Bus Rapid Transit, BRT*) може суттєво вплинути на вибір способу пересування мешканцями міста. Якщо тарифи на проїзд і час поїздки навіть залишаться на рівні існуючого автобусного сполучення, 25 % користувачів легкових автомобілів і 30 % користувачів мотоциклів ладні перейти на BRT [18]. Результати оцінних розрахунків показали, що впровадження зони із заборонаю руху моторизованого транспорту (*low emission zone*) в місті Падуя (Італія), дозволить скоротити використання індивідуального транспорту до 8 % серед населення, яке здійснює пересування до цієї зони [19].

Рівень викидів забруднюючих речовин змінюється залежно від обсягу спаленого палива в процесі експлуатації автомобільного транспорту. До основних чинників, що сприяють підвищенню витрат палива, належать: технічний стан транспортного засобу, нерегулярне технічне обслуговування, тип і якість палива, кліматичні умови, рівень завантаження транспортного засобу, стиль водіння і швидкість руху, тип двигуна і відповідність певним екологічним стандартам тощо [20, 21].

Оцінка екологічних наслідків транспортного процесу ґрунтується на різних підходах, які можна класифікувати наступним чином: за пробігом транспортного засобу, режимами руху, типом палива, а також за деталізованою оцінкою, що враховує технічні характеристики транспортного засобу, умови експлуатації тощо [22–24]. Застосування зазначених методів дозволяє отримати комплексну оцінку впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище з урахуванням різних чинників, що впливають на інтенсивність викидів забруднюючих речовин. При цьому, слід враховувати, що значення питомих викидів забруднюючих речовин, які закладаються під час проведення розрахунків для різних країн зазвичай відрізняються. Насамперед це зумовлено різним складом та якістю палива, специфічним розподілом структури парку транспортних засобів відносно екологічних стандартів, рівнем розвитку транспортної інфраструктури, погодно-

кліматичними умови тощо [25]. З огляду на зазначені відмінності, для отримання більш точної оцінки екологічного впливу доцільно використовувати показники питомих викидів, що відповідають конкретним місцевим умовам, оскільки застосування узагальнених або невідповідних даних може призвести до значних помилок оцінних розрахунків. Під час обґрунтування проектних рішень щодо підвищення ефективності роботи транспорту, для співставлення екологічних та економічних показників, досить часто обсяги викидів забруднюючих речовин приводять до вартісної оцінки [26].

Мета статті

Формалізація підходу щодо оцінки екологічної ефективності міської транспортної системи в контексті забезпечення сталості її функціонування.

Виклад основного матеріалу

Встановлення обсягу викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобілів пропонується виконати на основі витрат палива, що можуть бути встановлені на підставі проведення мережного розрахунку.

Для розрахунку викидів забруднюючих речовин було обрано методику визначення викидів відповідно до ДСТУ 9030:2020 [24], яку адаптовано для проведення мережного розрахунку. При оцінці викидів від індивідуального транспорту (ІТ) доцільно використовувати усереднені показники з деталізацією за типами палива, що використовується. Це дозволяє підвищити точність розрахунків і врахувати вплив автомобільного транспорту за видами палива на навколишнє середовище. Відповідно до цього екологічні наслідки роботи ІТ можуть бути встановлені на підставі залежності:

$$C_{\text{еколог}}^{\text{ІТ}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K L_{\text{ноізоіj}}^{(\text{ІТ})k} \cdot h_{ij}^{(\text{ІТ})k} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{e=1}^E \frac{Q_f^{(\text{ІТ})} \cdot k_{\text{npf}}}{100 \cdot 1000} \cdot \Delta_f^{(\text{ІТ})} \cdot k_{\text{нсfe}} \cdot k_{\text{ТСfe}} \cdot s_{\text{еe}}, \quad (1)$$

де $L_{\text{ноізоіj}}^{(\text{ІТ})k}$ - пробіг легкового автомобіля між транспортними районами i та j шляхом пересування k , км;

$h_{ij}^{(\text{ІТ})k}$ - величина транспортної кореспонденції,

що реалізується між транспортними районами i та j за шляхом пересування k , авт.;

$Q_f^{(\text{ІТ})}$ - середня витрата f -го виду палива легковим автомобілем при експлуатації у міському режимі, л/100 км;

k_{npf} - щільність палива, кг/л;

$\Delta_f^{(\text{ІТ})}$ - частка легкових автомобілів у транспортному потоці, що працюють на f -му виді палива;

$k_{\text{нсfe}}$ - усереднений питомий викид e -ої забруднюючої речовини в розрахунку на 1 т витраченого палива виду f , кг/т;

$k_{\text{ТСfe}}$ - коефіцієнт впливу технічного стану автотранспорту, що працює на f -му виді палива на питомий викид e -ої забруднюючої речовини;

$s_{\text{еe}}$ - вартісна оцінка викидів e -ої забруднюючої речовини, грн./кг.

Розрахунок показників пробігу легкових автомобілів $L_{\text{ноізоіj}}^{(\text{ІТ})k}$ та величини кореспонденції $h_{ij}^{(\text{ІТ})k}$ між транспортними районами за встановленими шляхами пересування здійснюється із застосуванням модельного підходу.

Середні витрати f -го виду палива легковим автомобілем у міському режимі руху $Q_f^{(\text{ІТ})}$ мають визначатись з урахуванням місцевих умов.

Частку легкових автомобілів $\Delta_f^{(\text{ІТ})}$ було обрано згідно проведеного дослідження, яке базувалось на аналізі даних про надання адміністративних послуг, пов'язаних з обліком транспортних засобів [27].

Значення параметрів щільності палива k_{npf} , усереднених питомих викидів $k_{\text{нсfe}}$ та коефіцієнтів технічного стану автотранспорту $k_{\text{ТСfe}}$ приймали згідно з даними ДСТУ 9030:2020 [24].

Аналіз усереднених питомих викидів $k_{\text{нсfe}}$ показав, що частка шкідливих сполук у загальному обсязі викидів значно відрізняється залежно від виду палива. Так, при згорянні бензину або дизельного палива основна питома вага припадає на вуглекислий газ (91,97% та 97,50% відповідно) у той час як у випадку скрапленого газу ця сполука відсутня. Натомість, значна питома вага припадає на оксид вуглецю (80,6%), неметанові леткі органічні сполуки (10,3%) та діоксид азоту (8,4%). (табл. 1).

Таблиця 1

Співвідношення викидів забруднюючих речовин на тону спаленого палива

Вид забруднюючої речовини	Вид палива					
	Бензин		Дизельне паливо		Газ скраплений	
	кг/т	Частка в загальній кількості, %	кг/т	Частка в загальній кількості, %	кг/т	Частка в загальній кількості, %
Оксид вуглецю, CO	201,8	5,83%	36,2	1,1%	201,8	80,6%
Неметанові леткі органічні сполуки, NMVOCs	53	1,53%	3,08	0,1%	25,7	10,3%
Метан, CH ₄	0,94	0,03%	0,083	0,0%	0,96	0,4%
Діоксид азоту, NO ₂	21	0,61%	31,4	1,0%	21	8,4%
Сажа, C	0	0,00%	3,85	0,1%	0	0,0%
Оксид азоту, NO	0,188	0,01%	0,165	0,0%	0	0,0%
Аміак, NH ₃	0,004	0,00%	0	0,0%	0	0,0%
Вуглекислий газ, CO ₂	3183	91,97%	3138	97,5%	0	0,0%
Діоксид сірки, SO ₂	1	0,03%	4,3	0,1%	1	0,4%
Бенз(а)пірен, C ₂₀ H ₁₂	0	0,00%	0,03	0,0%	0	0,0%
Сума	3460,93	100%	3217,11	100%	250,46	100%

У той час як структуру парку легкових автомобілів можна розглядати як більш сталу, маршрутна система міського пасажирського транспорту періодично має переглядатись. Під час удосконалення маршрутної системи можуть корегуватись траси маршрутів, виконуватись перерозподіл транспортних засобів між маршрутами, вирішується завдання оптимізації пасажиромісткості транспортних засобів на окремих маршрутах виходячи з параметрів пасажиропотоку тощо. Зважаючи на зазначене, під час аналізу викидів, що завдаються маршрутним пасажирським транспортом (МПТ) доцільним є застосування більш деталізованого підходу з урахуванням конкретних технічних характеристик марок транспортних засобів, що працюють на маршрутах.

Екологічні наслідки роботи маршрутного пасажирського транспорту пропонується визначати так:

$$C_{\text{еколог}}^{\text{МПТ}} = \sum_{r=1}^R L_{mr} \cdot n_{pr}^{\tau} \cdot \sum_{f=1}^F \sum_{e=1}^E \frac{Q_{fr}^{(\text{МПТ})} \cdot k_{npf}}{100 \cdot 1000} \cdot k_{nsfe} \cdot k_{TCfe} \cdot S_{ge}, \quad (2)$$

де L_{mr} - довжина маршруту r , км;

τ - період моделювання;

n_{pr}^{τ} - кількість виконаних рейсів за період τ на маршруті r , од.;

$Q_{fr}^{(\text{МПТ})}$ - середні витрати f -го виду палива транспортними засобами, що працюють на маршруті r , л/100 км.

Значення середніх витрат палива $Q_{fr}^{(\text{МПТ})}$ обираються виходячи з технічних характеристик марок транспортних засобів, що працюють на конкретному маршруті. Крім цього, згідно з [28] під час визначення цього параметру має бути враховано низку експлуатаційних чинників.

Практичне застосування запропонованого підходу було реалізовано на базі транспортної моделі м. Харкова, що була розроблена з використанням програмного забезпечення PTV Visum. Транспортна модель ґрунтується на актуальних даних щодо існуючої інфраструктури, параметрів транспортних та пасажирських потоків, станом на осінь 2021 року. В межах даної роботи екологічна оцінка проводилась для двох систем транспорту: ІТ (легкові автомобілі) та МПТ.

В результаті проведення імітаційного моделювання було встановлено середньодобові інтенсивності руху транспортних засобів та пасажиропотоки для зазначених систем транспорту. Так середньодобова кількість транспортних кореспонденцій, що реалізуються ІТ склала 747989 од./добу, що при середньому рівні заповнення легкового автомобіля 1,5 пас. відповідає обсягу перевезень 1121984 пас./добу. За розрахунковий період МПТ було виконано 18622 рейсів та загальний пробіг становив $1,67 \cdot 10^5$ км. Сумарний обсяг перевезень складає 1521848 пас./добу.

В контексті проведення екологічної оцінки приймали, що викиди забруднюючих речовин від експлуатації електричних транспортних засобів, які складають певну частину в обох системах транспорту є нульовими. Відповідно до цього, розрахунок забруднюючих речовин проводився для

легкових автомобілів, що працюють на бензині, дизельному паливі та скрапленому газі, а для МПТ увагу було зосереджено на автобусних маршрутах.

Усереднений розподіл легкових автомобілів за видами палива було прийнято згідно з даними праці [27].

Під час аналізу щодо розподілу автобусів за видами палива, було встановлено марки транспортних засобів та їх реєстраційні номери відповідно до інформаційного ресурсу [29]. Аналіз показав, що на всіх транспортних засобах, що експлуатуються на маршрутах та оснащені

бензиновими двигунами, встановлено систему газобалонного обладнання, що забезпечує їхню роботу на газовому паливі [30].

З огляду на брак даних щодо розподілу МПТ за видами природного газу в Україні, для розрахунків прийнято використання скрапленого газу, аналогічно до методики, застосованої для ІТ. Результати розподілу транспортних засобів за видами палива представлено на рис. 1.

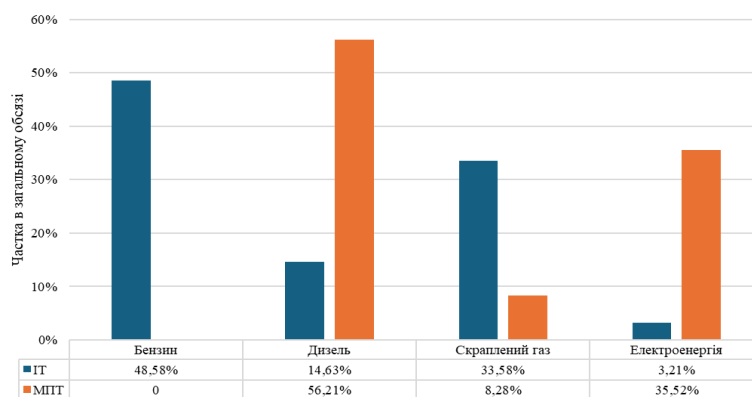


Рис. 1. Усереднений розподіл транспортних засобів за видами палива

З урахуванням того, що частка легкових автомобілів з електричними двигунами у транспортному потоці, згідно з даними праці [27], становить 3,21 %, було здійснено коригування кількості транспортних кореспонденцій, яка склала 723978 од./добу, що еквівалентно обсягу пасажирських перевезень у 1085968 пас./добу.

Оскільки в межах МПТ розглядається виключно автобусний вид транспорту, частка якого становить 64,49 %, кількість виконаних рейсів було скориговано до 9723 од./добу та загальний обсяг перевезень склав 338787 пас./добу. Результати розрахунку середньодобових значень викидів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Середньодобові викиди забруднюючих речовин індивідуального та маршрутного пасажирського видів транспорту (значення у таблиці зазначено в тоннах)

Вид забруднюючої речовини	ІТ				МПТ		
	Тип палива						
	Бензин	Дизель	Скрап-лений газ	Σ	Скрап-лений газ	Дизель	Σ
Сажа, С	0	0,59	0	0,59	0	0,09	0,09
Бенз(а)пірен, C ₂₀ H ₁₂	0	2,56·10 ⁻³	0	2,56·10 ⁻³	0	3,99·10 ⁻⁴	3,99·10 ⁻⁴
Метан, CH ₄	0,44	0,01	0,25	0,70	0	4,65·10 ⁻³	4,65·10 ⁻³
Оксид вуглецю, CO	93,40	4,64	52,78	150,81	0,34	0,75	1,08
Вуглекислий газ, CO ₂	982,09	267,94	0	1250,03	0	41,73	41,73
Аміак, NH ₃	1,23·10 ⁻³	0	0	1,23·10 ⁻³	0	0	0
Неметанові леткі органічні сполуки, NMVOCs	16,35	0,26	4,48	21,10	0,05	0,11	0,16
Оксид азоту, NO	0,06	0,01	0	0,07	0	1,60·10 ⁻³	1,60·10 ⁻³
Діоксид азоту, NO ₂	5,83	2,55	3,30	11,67	0,02	0,39	0,41
Діоксид сірки, SO ₂	0,31	0,37	0,17	0,85	0,02	0,39	0,41

Виходячи з отриманих результатів виявлено, що обсяг викидів CO_2 є найбільшим серед інших викидів для обох видів транспорту (ІТ - 1250,03 т/добу, МПТ - 41,73 т/добу). На основі отриманих даних було визначено середні викиди, що

припадають на одного перевезеного пасажирів досліджуваних систем транспорту та порівняно їх вагу між собою (див. рис. 2-4).

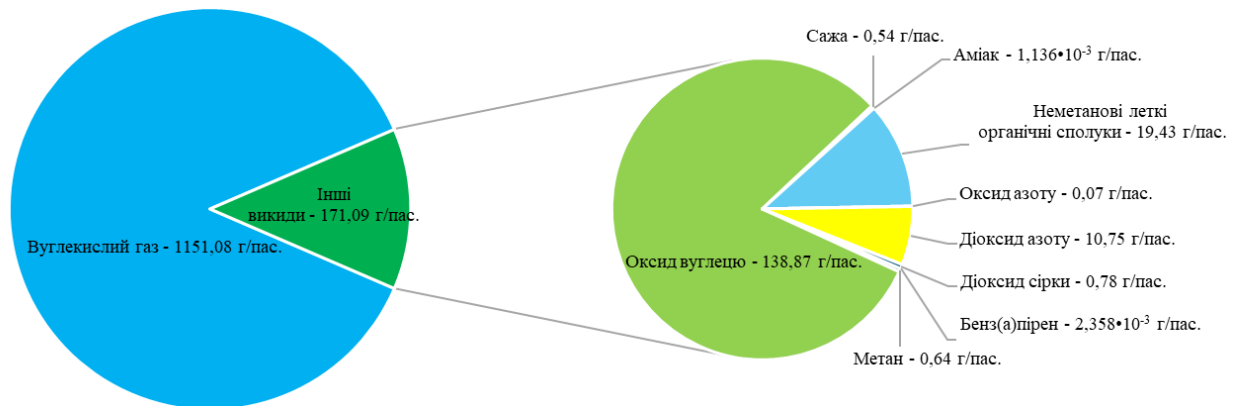


Рис. 2 - Викиди забруднюючих речовин, що припадають одного пасажирів ІТ

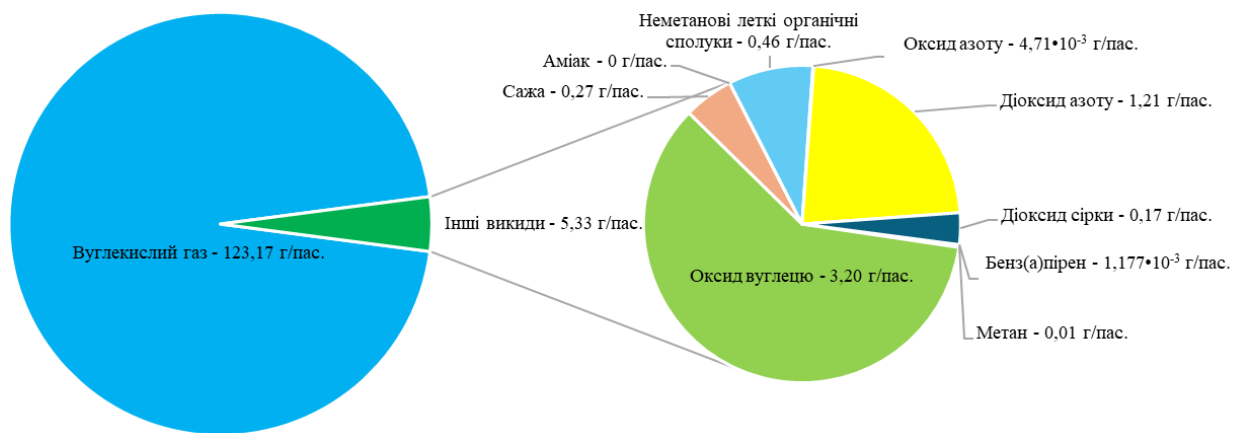


Рис. 3 - Викиди забруднюючих речовин, що припадають одного пасажирів МПТ

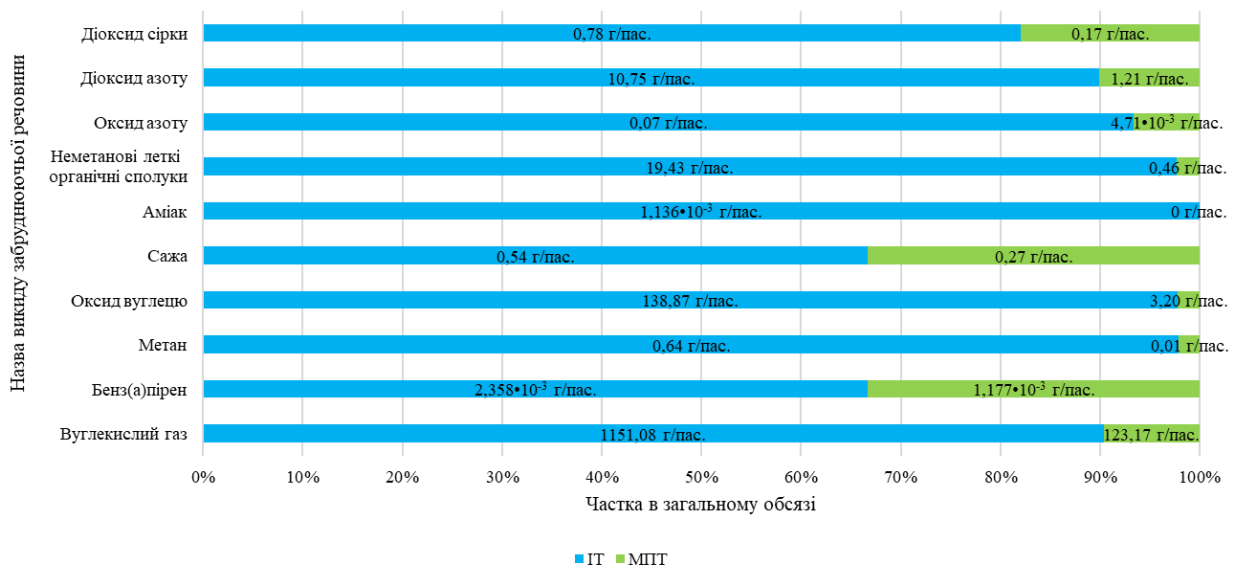


Рис. 4 - Співвідношення викидів забруднюючих речовин, що припадають на одного пасажирів індивідуального та маршрутнього пасажирського видів транспорту

Виходячи з приведених розрахунків ІТ домінує в генерації викидів за всіма видами забруднюючих речовин порівняно з МПТ. Особливо великий обсяг викидів спостерігається для CO₂ - 1151,08 г/пас., CO - 138,7 г/пас. та NMVOCs - 19,43г/пас. Натомість МПТ виробляє набагато меншу кількість викидів, але має відносно високу концентрацію C - 0,27 г/пас., C₂₀H₁₂ - 1,18·10⁻³ г/пас. та SO₂ - 0,17 г/пас. Викиди NH₃ при спалюванні палива МПТ відсутні, у той час для ІТ вони є наявними. Частка викидів CH₄ - 0,01 г/пас. в МПТ також вкрай мала, у той час як для ІТ вона складає 0,64 г/пас. Виходячи з проведеного аналізу можна дійти висновку, що підвищення привабливості послуг МПТ для населення та відповідно збільшення частки пересувань даним способом, сприятиме суттєвому скороченню викидів та сприятиме підвищенню екологічної ефективності функціонування міської транспортної системи.

Висновки

У статті запропоновано підхід щодо оцінки екологічної ефективності міської транспортної системи в контексті забезпечення сталості її функціонування, що ґрунтується на адаптації існуючої методики оцінки викидів забруднюючих речовин у відпрацьованих газах автомобілів до проведення мережного розрахунку.

Результати апробації зазначеної методики для м. Харкова показали, що підвищення привабливості послуг маршрутного пасажирського транспорту для населення та відповідно збільшення частки пересувань даним способом, сприятиме суттєвому скороченню викидів та сприятиме суттєвому підвищенню екологічної ефективності, а отже й забезпеченню сталості міської транспортної системи.

В якості напрямку подальших досліджень передбачається проведення комплексної оцінки ефективності функціонування маршрутної системи з використанням методу багатокритеріального аналізу.

Література

1. World motor vehicle production by country/region and type [Електронний ресурс] / International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. – 2023. – Режим доступу: <https://www.oica.net/wp-content/uploads/By-country-region-2023.pdf>.
2. Ortúzar J. de D. Sustainable Urban Mobility: What Can Be Done to Achieve It? [Text] / J. de D. Ortúzar // Journal of the Indian Institute of Science. – 2019. – Vol. 99, № 4. – P. 683–693.
3. Естїлл Я. Вплив на здоров'я та соціальні витрати, пов'язані із забрудненням повітря у великих містах

України [Електронний ресурс] / Програма розвитку ООН. – 2022. – Режим доступу: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/vplyv-na-zdorovya-ta-sotsialni-vytraty-povyazani-iz-zabrudnenniam-povitrya-u-velykykh-mistakh>

4. Miner, P. Car harm: A global review of automobility's harm to people and the environment [Text] / P. Miner, B. M. Smith, A. Jani, G. McNeill, A. Gathorne-Hardy // Journal of Transport Geography. – 2024. – Vol. 115. – Art. 103817.
5. Hasselwander, S. The Impact of Climate Change on Energy Consumption of Passenger Cars [Text] / S. Hasselwander, A. Galich, S. Nieland // World Electric Vehicle Journal. – 2022. – Vol. 13, No. 8. – Art. 146.
6. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers [Електронний ресурс] / Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). – 2021. – Режим доступу: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wq1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf.
7. New data: CO₂ emissions of new cars and vans continue to decrease as electric vehicle sales in Europe grow [Електронний ресурс] // European Environment Agency. – June 10, 2024. – Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/new-data-co2-emissions-of-new-cars-and-vans>.
8. Ayetor, G. Energy efficiency and emissions performance of electric vehicles: A case study in Ghana [Text] / G. Ayetor, A. Sunnu, J. Parbey, E. Adjei // Energy. – 2021. – Vol. 235. – Art. 119852.
9. Siddiqui, O. Social cost-benefit analysis of different types of buses for sustainable public transportation [Text] / O. Siddiqui, H. Ishaq, D. A. Khan, H. Fazel // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Art. 140656.
10. Proff, H., Competitiveness of the EU automotive industry in electric vehicles [Електронний ресурс] / H. Proff, D. Kilian. – [S. l.] : Directorate-General for Enterprise and Industry, European Commission; University of Duisburg-Essen, 2012. – Режим доступу: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a2ea34db-8154-4d3d-9075-e97bf0329e3f/language-en>.
11. Donato, T., Evaluation of emissions of CO₂ and air pollutants from electric vehicles in Italian cities [Text] / T. Donato, G. Congedo, F. De Cillis, et al. // Applied Energy. – 2015. – Vol. 157. – P. 675–687.
12. Lucas, A. Impact of energy supply infrastructure in life cycle analysis of hydrogen and electric systems applied to the Portuguese transportation sector [Text] / A. Lucas, R. Costa Neto, C. Alexandra Silva // International Journal of Hydrogen Energy. – 2012. – Vol. 37, №. 15. – P. 10973–10985.
13. Holnicki, P. Impact of Vehicle Fleet Modernization on the Traffic-Originated Air Pollution in an Urban Area—A Case Study [Text] / P. Holnicki, Z. Nahorski, A. Kaluszko // Atmosphere. – 2021. – Vol. 12, №. 12. – Art. 1581.
14. Dragu, V. The Spatial Accessibility of High-Capacity Public Transport Networks—The Premise of Sustainable Development [Text] / V. Dragu, A. Ruscă, M. Augustin Roșca // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, №. 1. – Art. 343.

15. Ardila-Gomez, A. Public Transport Reform in Developing Countries: Lessons from Experience [Text] / A. Ardila-Gomez, G. Darido // *Transportation Research Procedia*. – 2025. – Vol. 82. – P. 2737–2749.

16. Betts, G. Cycling infrastructure and deprivation: An empirical investigation [Text] / G. Betts, D. Potoglou // *Journal of Transport & Health*. – 2025. – Vol. 41. – Art. 101974.

17. Rames, C. Trends and drivers of pedestrian mobility in Barcelona: A fine-grained study across its commercial tissue [Text] / C. Rames, D. Rhoads, A. Meseguer-Artola, et al. // *Cities*. – 2025. – Vol. 158. – Art. 105655.

18. Satiennam, T. Potential for modal shift by passenger car and motorcycle users towards Bus Rapid Transit (BRT) in an Asian developing city [Text] / T. Satiennam, S. Jaensirisak, W. Satiennam, S. Detdamrong // *IATSS Research*. – 2016. – Vol. 39, № 2. – P. 121–129.

19. Ceccato, R. Low emission zone and mobility behavior: Ex-ante evaluation of vehicle pollutant emissions [Text] / R. Ceccato, R. Rossi, M. Gastaldi // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. – 2024. – Vol. 185. – P. 104101.

20. Абрамов, Д.В. Вплив показників якості палива та технічний стан автомобіля під час руху [Текст] / Д.В. Абрамов, В.О. Тесля, А.Б. Гупка, М.Д. Сінравська // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. – 2023. – Т. 8, № 39, ч. II. – С. 169–175.

21. Zacharof, N. Review of in use factors affecting the fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars [Електронний ресурс] / N. Zacharof, et al. – *Ispira: European Commission*, 2016. – 196 p. – Режим доступу: <https://data.europa.eu/doi/10.2790/140640>.

22. Ryu, B.Y. Development of a corrected average speed model for calculating carbon dioxide emissions per link unit on urban roads [Text] / B.Y. Ryu, H.J. Jung, S.H. Bae // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2015. – Vol. 34. – P. 245–254.

23. Ntziachristos, L. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Update 2024. Category: 1.A.3.b.i-iv Road transport [Електронний ресурс] / L. Ntziachristos, et al. – Copenhagen. – Режим доступу: <https://copert.emisia.com/wp-content/uploads/2024/07/1.A.3.b.i-iv-Road-transport-2024.pdf>.

24. ДСТУ 9030:2020. Автомобільні дороги. Оцінка впливів на навколишнє середовище. Вимоги до проектної документації. – Чинний від 2021-09-01. – Вид. офіц. – [Б. м.] : ДП «УкрНДНЦ».

25. Терентьев, О.М. Влияние промышленного автомобильного транспорта на окружающую среду [Текст] / О.М. Терентьев, М.И. Сергеев, В.Г. Смоляр // *Энергетика: экономика, технологии, экология*. – 2020. – № 3. – С. 85–91.

26. Essen, H. Handbook on the external costs of transport : version 2019 – 1.1 [Електронний ресурс] / H. Essen, et al. – [S. l.] : European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport, 2020. – 332 p. – Режим доступу: <https://doi.org/10.2832/51388>.

27. Лифенко, С.Е. До питання оцінювання ефективності проектних рішень щодо забезпечення сталості міської

транспортної системи [Текст] / С.Е. Лифенко, Д.П. Понкратов, В.В. Сабадаш // *Комунальне господарство міст*. – 2024. – Т. 6, № 187. – С. 313–318.

28. Про затвердження Норм витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті [Електронний ресурс] : від 10.02.1998 № 43 : станом на 24 січ. 2012 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0043361-98#Text>.

29. Маршрути громадського транспорту [Електронний ресурс] // Харків транспортний. – Режим доступу: <https://gortransport.kharkov.ua/>.

30. Портал відкритих даних. Відомості про транспортні засоби та їх власників. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://data.gov.ua/dataset/06779371-308f-42d7-895e-5a39833375f0>

References

1. World motor vehicle production by country/region and type. (2023). International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. <https://www.oica.net/wp-content/uploads/By-country-region-2023.pdf>.
2. Ortúzar, J. d. D. (2019). Sustainable Urban Mobility: What Can Be Done to Achieve It? *Journal of the Indian Institute of Science*, 99(4), 683–693.
3. Estill, J. (2022). Health impacts and social costs associated with air pollution in larger urban areas of Ukraine. *United Nations Development Programme*. <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/vplyv-na-zdorovya-ta-sotsialni-vytraty-povyazani-iz-zabrudnenniam-povitrya-u-velykykh-mistakh>
4. Miner, P., Smith, B. M., Jani, A., McNeill, G., & Gatherne-Hardy, A. (2024). Car harm: A global review of automobility's harm to people and the environment. *Journal of Transport Geography*, 115, 103817.
5. Hasselwander, S., Galich, A., & Nieland, S. (2022). Impact of Climate Change on the Energy Consumption of Passenger Car Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 13(8), 146.
6. Climate change 2021 The physical science basis summary for policymakers, technical summary, frequently asked questions and glossary. (б. д.). Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf
7. New data: CO₂ emissions from new cars and vans further decrease as electric vehicle sales grow in Europe. (2024, 10 June). European Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/new-data-co2-emissions-of-new-cars-and-vans>.
8. Ayetor, G. K., Mbonigaba, I., Sunnu, A. K., & Nyantekyi-Kwakye, B. (2021). Impact of replacing ICE bus fleet with electric bus fleet in Africa: A lifetime assessment. *Energy*, 221, 119852.
9. Siddiqui, O., Ishaq, H., Khan, D. A., & Fazel, H. (2024). Social cost-benefit analysis of different types of buses for sustainable public transportation. *Journal of Cleaner Production*, 140656.

10. Proff, H., & Kilian, D. (2022). Competitiveness of the EU Automotive Industry in Electric Vehicles. University of Duisburg-Essen Chair of General Business Administration & International Automotive Management. https://circabc.europa.eu/sd/a/481bd601-0f6a-466a-9f95-4aab4827a8ba/report-duisburg-essen-electric-vehicles_en.pdf.
11. Donato, T., Licci, F., D'Elia, A., Colangelo, G., Laforgia, D., & Ciancarelli, F. (2015). Evaluation of emissions of CO₂ and air pollutants from electric vehicles in Italian cities. *Applied Energy*, 157, 675–687.
12. Lucas, A., Neto, R. C., & Silva, C. A. (2012). Impact of energy supply infrastructure in life cycle analysis of hydrogen and electric systems applied to the Portuguese transportation sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15), 10973–10985.
13. Holnicki, P., Nahorski, Z., & Kałuszko, A. (2021). Impact of Vehicle Fleet Modernization on the Traffic-Originated Air Pollution in an Urban Area—A Case Study. *Atmosphere*, 12(12), 1581.
14. Dragu, V., Ruscă, A., & Roșca, M. A. (2025). The Spatial Accessibility of High-Capacity Public Transport Networks—The Premise of Sustainable Development. *Sustainability*, 17(1), 343.
15. Ardila-Gomez, A., & Darido, G. (2025). Public Transport Reform in Developing Countries: Lessons from Experience. *Transportation Research Procedia*, 82, 2737–2749.
16. Betts, G., & Potoglou, D. (2025). Cycling infrastructure and deprivation: An empirical investigation. *Journal of Transport & Health*, 41, 101974.
17. Rames, C., Rhoads, D., Meseguer-Artola, A., Lozano, S., Borge-Holthoefer, J., & Solé-Ribalta, A. (2025). Trends and drivers of pedestrian mobility in Barcelona: A fine-grained study across its commercial tissue. *Cities*, 158, 105655.
18. Satiennam, T., Jaensirisak, S., Satiennam, W., & Detdamrong, S. (2016). Potential for modal shift by passenger car and motorcycle users towards Bus Rapid Transit (BRT) in an Asian developing city. *IATSS Research*, 39(2), 121–129.
19. Ceccato, R., Rossi, R., & Gastaldi, M. (2024). Low emission zone and mobility behavior: Ex-ante evaluation of vehicle pollutant emissions. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 185, 104101.
20. Abramov, D., Teslia, V., Gupka, A., & Sipravska, M. (2023). Impact of Fuel Parameters on Vehicle Technical Condition During Operation. *Central ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 8(39, part II), 169–175.
21. Zacharof, N., Fontaras, G., Ciuffo, B., Tsiakmakis, S., Anagnostopoulos, K., Marotta, A., & Pavlovic, J. (2016). Review of in use factors affecting the fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars (EUR 27819 EN). European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2790/140640>
22. Ryu, B. Y., Jung, H. J., & Bae, S. H. (2015). Development of a corrected average speed model for calculating carbon dioxide emissions per link unit on urban roads. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 245–254.
23. Ntziachristos, L., Samaras, Z., Kouridis, C., & others. (2024). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 – Update 2024. Category: 1.A.3.b.i-iv Road transport. European Environment Agency. <https://copert.emisia.com/wp-content/uploads/2024/07/1.A.3.b.i-iv-Road-transport-2024.pdf>
24. SE "UkrNDNC". (n. d.). Highways. Impact assessment on the environment. Requirements for design documentation (DSTU 9030:2020).
25. Terentiev, O., Sergienko, M., Smoliar, V. (2020). Environmental impact of industrial transport. *Power engineering: economics, technique, ecology*, (3), 85–91.
26. Essen, H., Fiorello, D., El Beyrouty, K., Bieler, C., Wijngaarden, L., Schroten, A., Parolin, R., Brambilla, M., Sutter, D., Maffii, S., & Fermi, F. (2020). Handbook on the external costs of transport : version 2019 – 1.1. European Commission: Directorate-General for Mobility and Transport. <https://doi.org/10.2832/51388>.
27. Lyfenko, S., Ponkratov, D., & Sabadash, V. (2024). On the issue of assessing the effectiveness of design solutions to ensure the sustainability of the urban transport system. *Municipal Economy of Cities*, 6(187), 313–318.
28. On approval of fuel and lubricant consumption standards for road transport, № 43 (2012). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0043361-98#Text>.
29. Routes of transit transport. (n. d.). Kharkiv transport. <https://gortransport.kharkov.ua/>.
30. Open data portal. Information about vehicles and their owners. <https://data.gov.ua/dataset/06779371-308f-42d7-895e-5a39833375f0>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю. О. Давідіч, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків.

Автор: ЛИФЕНКО Сергій Едуардович
Аспірант

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків,
E-mail – lyfenkoserqii@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9418-3033>

Автор: ПОНКРАТОВ Денис Павлович
доктор технічних наук, доцент

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків,
E-mail – dpponkratov@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3777-040X>

ENVIRONMENTAL ASPECT OF URBAN TRANSPORT SYSTEM SUSTAINABILITY ASSESSMENT

S. Lyfenko, D. Ponkratov

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The issue of air pollution from vehicle emissions is one of the most pressing environmental and socio-economic threats of today. The growing number of vehicles leads to increased atmospheric pollution, which is particularly evident in major cities, where the density of transport flows greatly exceeds that of suburban areas. This results in worsened air quality, negatively impacting public health and ecosystems, and further aggravating the problem of climate change.

One of the key solutions to this issue is ensuring the sustainable development of transportation systems, which should combine social, economic, and environmental efficiency. The environmental aspect of assessing the sustainability of urban transportation systems involves evaluating their impact on the environment and the effectiveness of measures to reduce this impact. Priority areas include reducing pollutant emissions, transitioning to alternative energy sources, and developing electric transportation. Additionally, the development of infrastructure for cycling and walking plays a crucial role in reducing the level of motorization.

When assessing measures to improve the environmental efficiency of a specific transport system, a range of factors must be considered that characterize the specific features of the functioning of each city's transport system. Such factors include the composition of the transport flow; the distribution of the vehicle fleet structure by fuel type; the characteristics of travel distribution by mode of transport; weather and climatic conditions; the technical condition of vehicles, and so on. Considering these factors will enhance the accuracy and reliability of the results of evaluating the impact of transport on the environment, thus allowing for a more grounded approach to establishing the priority directions for ensuring the sustainability of the urban transport system.

The article proposes an approach to assessing the environmental efficiency of the urban transport system in the context of ensuring the sustainability of its functioning, which is based on the adaptation of the existing methodology for assessing pollutant emissions in vehicle exhaust gases to network calculation.

The results of testing the specified methodology for the city of Kharkiv showed that increasing the attractiveness of urban public transport services for the population and, accordingly, increasing the share of travel by this method will contribute to a significant reduction in emissions and will contribute to a significant increase in environmental efficiency, and therefore ensuring the sustainability of the urban transport system.

As a direction of further research, it is planned to conduct a comprehensive assessment of the efficiency of the route system using the multi-criteria analysis method.

Keywords: environmental assessment, pollutant emissions, sustainable transport system development, fuel type, transport modeling.