

Мармут І.А., Безвідний В.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВИКИДІВ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН АВТОБУСА З ДИЗЕЛЬНИМ ДВИГУНОМ

Невід'ємною частиною загальної проблеми, пов'язаної з удосконаленням конструкції автомобілів, що випускаються, підтримкою їх у працездатному стані, якістю палива, мастильних матеріалів та їх економії, поліпшенням дорожньої мережі та організацією руху транспортних машин, є їх токсичність.

Розробкою питань економії паливно-енергетичних ресурсів та зниження токсичності двигунів займалися багато дослідників і в даний час є значна кількість відповідних рекомендацій. Однак прості та досить ефективні пропозиції ще підлягають розробці.

Завдання оптимізації роботи пасажирського автотранспорту з урахуванням екологічної безпеки є однією зі складових регулюючої діяльності людини, спрямованої на оздоровлення міського середовища. Таким чином, зменшення шкідливих викидів двигунами автомобілів є найважливішою суспільною та соціальною проблемою.

При вирішенні цієї проблеми переважними є напрями, реалізація яких супроводжується економією палива та інших матеріально-технічних ресурсів. Відомі технічні рішення для зниження шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигунів зазвичай пов'язані зі зміною їх конструкцій (це потребує значних витрат) або застосуванням дорогих допоміжних пристроїв для нейтралізації шкідливих речовин (їх установка на автомобіль часто супроводжується погіршенням економічності двигуна). У зв'язку з цим доцільно насамперед впливати на ті чинники, які дозволяють знизити шкідливі викиди автомобілями (і, відповідно, витрату палива) під час виконання транспортної роботи.

У статті розроблено математичні моделі для розрахунку викидів токсичних речовин автобусів із дизельними двигунами. Також виконано аналіз результатів машинного експерименту щодо розрахунків шкідливих викидів на прикладі автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2.

Одним із напрямів підвищення паливної економічності та екологічної безпеки автобусів є використання на практиці раціональних режимів руху. Це дозволяє розглядати статтю, спрямовану на підвищення ефективності технічної експлуатації автомобілів за рахунок економії палива та зниження токсичності, актуальною.

Ключові слова: автобус, умови експлуатації, шкідливі викиди, екологічна безпека, математичні моделі, швидкість руху.

ВСТУП

Рухомий склад автомобільного транспорту є найважливішим фактором впливу на атмосферу, літосферу та гідросферу і тому він повинен розглядатися як складова глобальної екологічної проблеми країни. Негативний вплив автомобілів на довкілля проявляється насамперед у викидах шкідливих речовин з відпрацьованими газами – оксидів азоту, вуглецю, вуглеводнів, альдегідів, сажі та ін. Кількість токсичних компонентів, що викидаються рухомим складом автотранспорту, приблизно в 5-6 разів більша, ніж усіма іншими видами транспорту, разом узятими. Особливо це є актуальним для міст, де функціонує міський транспорт. Досі активно на маршрутах експлуатуються автобуси із дизельними двигунами. Як показують численні дослідження, дизельні двигуни є більш токсичними порівняно з іншими типами силових агрегатів [1, 2]. Тому питання щодо зниження шкідливого впливу міського транспорту є актуальними.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вирішенням проблеми екологічної безпеки займалися багато вчених України (Говорущенко М.Я., Гутаревич Ю.Ф., Канило П.М. та ін.). Аналіз їх робіт показав, що основними чинниками негативного впливу транспортних машин на довкілля є хімічні речовини, дим, вібрація, теплові викиди тощо. Робота автомобільного двигуна характеризується частою зміною швидкісних та навантажувальних режимів, на яких викидається певна кількість шкідливих речовин. Крім того, склад відпрацьованих газів значною мірою залежить від технічного стану двигуна та умов експлуатації. Для експлуатаційних цілей необхідно знати характеристики викиду шкідливих речовин у г/км залежно від швидкості руху, ваги автомобіля та сумарного дорожнього опору [1, 2].

Питання екологічної безпеки стоять на першому місці в усіх країнах. Проблемам шкідливих викидів двигунів внутрішнього згоряння автомобілів присвячено багато публікацій зарубіжних дослідників.

Існує безліч методів оцінки токсичності відпрацьованих газів (ВГ). Основні з них такі:

а) метод оцінки токсичності ВГ під час експлуатації автомобілів – визначаються окремі

компоненти шкідливих речовин на найбільш характерних режимах роботи автомобіля [3];

б) метод безпосереднього вимірювання – проба ВГ фільтрується, охолоджується, з неї видаляється волога і аналізується на вміст CO , CO_2 , NO_x та C_nH_m [4]. Недоліки – можливість адсорбції вуглеводнів матеріалами вимірювальної системи і розчинення оксидів азоту у вологі, що сконденсувалися;

в) метод аналізу загального обсягу суміші газів за їздовий цикл [5-7];

г) метод часткового відбору проб за цикл з розведенням їх інертним газом – встановлюється співвідношення між кількістю повітря, що всмоктується в двигун, і кількістю ВГ (можна використовувати на автомобілі, що рухається) [8, 9];

д) спосіб аналізу розведених проб повітрям (CVS) – федеральний стандарт США, застосовується у Японії. Дослідження проводяться на всіх режимах руху автомобіля [10];

е) метод аналізу індивідуальних проб газу – метод дискретного аналізу та відбору проб із їх аналізом на хроматографі [11-14];

ж) моторні випробування дизелів на токсичність ВГ [15, 16].

Кількісними показниками токсичності автомобільних двигунів є значення масових викидів токсичних речовин [1, 2].

Основними методами визначення масового викиду токсичних речовин є:

а) метод визначення продуктів згоряння виходячи з кількості палива, що витрачається автомобілями – простий, але неточний метод, тому що при цьому не враховуються умови руху, експлуатаційні показники роботи автомобілів тощо;

б) метод визначення вагового викиду токсичних речовин, виходячи з транспортної роботи – має майже ті самі недоліки;

в) метод визначення масового викиду токсичних речовин пропорційне пробігу автомобілів – найбільш точний метод, однак і він не враховує нерівномірність та умови руху автомобілів містом.

Найбільш повно відображають реальні умови експлуатації їздові цикли, які широко застосовуються при випробуваннях автомобілів на паливну економічність і токсичність ВГ. Відомі наступні цикли [5]: Європейський вимірювальний цикл NEDC (New European Driving Cycle), Японський вимірювальний цикл JC08, Американський вимірювальний цикл EPA FTP-75 (Federal Test Procedure 75), світовий вимірювальний цикл – WLTP (World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure).

Однак, широке застосування їздових циклів в умовах підприємств автотранспорту неможливо з причин відсутності достатньої кількості необхідного обладнання, його складністю та високою вартістю, великою трудомісткістю та тривалістю перевірки. У зв'язку з цим можна віддати перевагу математичному моделюванню для оцінки економічних та екологічних показників при випробуваннях по їздових циклах із застосуванням експериментальних характеристик двигунів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є виявлення основних заходів, що сприяють зменшенню вагового викиду шкідливих речовин та підвищенню екологічної безпеки автобусів. Для цього необхідно вдосконалити математичну модель для розрахунку викидів окремих токсичних компонентів відпрацьованих газів і встановити їх кількісні залежності від основних експлуатаційних факторів (швидкості руху) за допомогою машинного експерименту (на прикладі автобуса Mercedes-Benz O530 Citaro C2 з дизельним двигуном (рис. 1)) [17];



Рисунок 1 – Автобус Mercedes-Benz O530/Citaro C2, для якого отримані розрахункові залежності

шкідливих викидів від швидкості руху

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Розробка математичних моделей для розрахунку викидів токсичних речовин автобусом Mercedes-Benz O530/Citaro C2.

Для розрахунку кількості шкідливих речовин Q' , г/км, при русі автобуса з різними експлуатаційними режимами (навантаження, швидкість) використовуємо формулу проф. Говорущенко М.Я. [2]:

$$Q' = 0,0548 M_{\text{тв}} \cdot \rho_{\text{п}} (A_2 + B_2 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_1^2) \times [A \cdot i_{\text{к}} + B \cdot i_{\text{к}}^2 \cdot V_{\text{а}} + C(G_{\text{а}} \cdot \psi + 0,077 \cdot kF \cdot V_{\text{а}}^2)] \cdot (\alpha_1 + b_1 \cdot N_1) / \eta_i, \quad (1)$$

де $M_{\text{тв}}$ – молекулярна маса токсичних речовин, г;
 $\rho_{\text{п}}$ – густина палива, г/см³;
 A_2, B_2, C_2 – постійні коефіцієнти для різних токсичних речовин;
 N_1 – відсоток використання потужності;
 A, B, C – постійні для даного автомобіля коефіцієнти;
 $i_{\text{к}}$ – середнє значення передавального числа коробки передач;
 $V_{\text{а}}$ – середня технічна швидкість автомобіля, км/год;
 $G_{\text{а}}$ – вага автомобіля, Н;
 ψ – коефіцієнт сумарного дорожнього опору;
 kF – фактор обтічності автомобіля, Н·с²·м⁻²;
 α_1, b_1 – постійні для даного двигуна коефіцієнти;
 η_i – індикаторний ККД.

Замінімо вираз $(\alpha_1 + b_1 \cdot N_1)$ через α (коефіцієнт надлишку повітря):

$$Q' = 0,0548 M_{\text{тв}} \cdot \rho_{\text{п}} (A_2 + B_2 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_1^2) \cdot [A \cdot i_{\text{к}} + B \cdot i_{\text{к}}^2 \cdot V_{\text{а}} + C(G_{\text{а}} \cdot \psi + 0,077 kF \cdot V_{\text{а}}^2)] \cdot \alpha / \eta_i. \quad (2)$$

Значення молекулярних мас токсичних речовин наведено у табл. 1 [2].

Таблиця 1 – Молекулярні маси токсичних речовин $M_{\text{тв}}$

Токсична речовина	Хімічна формула	Молекулярна маса, г
Оксид вуглецю	CO	28
Діоксид азоту	NO ₂	46
Вуглеводні бензинів*, наведені	C ₆ H ₁₄	86
Вуглеводні дизельних палив*, наведені	C ₉ H ₂₀	128

*Усереднено: змінюються за марками палив та залежно від походження сировини.

Значення постійних коефіцієнтів A_2, B_2, C_2 для бензинових (Б) і дизельних (Д) двигунів наведені в табл. 2 [2].

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів A_2, B_2, C_2

Коефіцієнт	X_{CO}		X_{CH}		X_{NO_2}	
	Б	Д	Б	Д	Б	Д
A_2	4,02	0,05	0,077	0,017	0,181	0,02
B_2	-0,122	-1,5·10 ⁻³	-1,83·10 ⁻³	0,31·10 ⁻³	7,02·10 ⁻³	2,3·10 ⁻³
C_2	0,935·10 ⁻³	14·10 ⁻⁶	0,137·10 ⁻⁴	2,47·10 ⁻⁶	-0,68·10 ⁻⁴	-4·10 ⁻⁶

Відсоток використання потужності двигуна N_1 , %, для розглянутого автобуса в спорядженому стані (С) із повним завантаженням (П) визначається за формулою (3) [2] при відповідних значеннях

N_{\max} та $\eta_{\text{тр}}$ (табл. 3) [18]:

$$N_1 = \frac{0,0277(G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3)}{N_{\max} \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (3)$$

де G_a – вага автомобіля, Н;

kF – фактор обтічності автомобіля, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2$;

N_{\max} – максимальна потужність двигуна, кВт;

$\eta_{\text{тр}}$ – ККД трансмісії.

Таблиця 3 – Вихідні дані по автобусу Mercedes-Benz O530/Citaro C2

Показник	Значення показника
Індикаторний ККД η_i :	
– для спорядженого автобуса	0,48
– для автобуса з повним завантаженням	0,51
Робочий об'єм циліндрів V_h , л	14,618
Максимальна потужність двигуна N_{\max} , кВт	206
Передаточне число головної передачі i_o	3,920
Нижча температура згоряння палива H_H , кДж/кг	43000
Густина палива ρ_p , г/см ³	0,84
Радіус кочення колеса r_k , м	0,508
Хід поршня S_p , м	0,142
ККД трансмісії $\eta_{\text{тр}}$:	
– для спорядженого автобуса	0,79
– для автобуса з повним завантаженням	0,88
Вага автобуса G_a , Н:	
– спорядженого	119584
– з повним завантаженням	171675
Фактор обтічності kF , $\text{Н} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-2}$	2,95

$$\begin{aligned} N_{1c} &= 1,7 \cdot 10^{-4} (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3); \\ N_{1п} &= 1,53 \cdot 10^{-4} (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0,077kF \cdot V_a^3); \end{aligned} \quad (4)$$

Значення коефіцієнтів A , B , C для автобуса Mercedes [18]:

$$A = 1,19; B = 0,038; C_c = 3,5 \cdot 10^{-3}; C_n = 3,15 \cdot 10^{-3}.$$

Значення ρ_p , kF та η_i наведені в табл. 3.

Значення i_k та ψ визначаються за формулами [18].

$$i_k = 61,1/V_a; \quad (5)$$

$$\psi = 0,8/V_a. \quad (6)$$

Після підстановки значень рівняння (2) по трьом видам шкідливих речовин для автобуса Mercedes набуває наступного вигляду.

Для спорядженого автобуса:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{CCO}} &= 0,0548 \cdot 28 \cdot 0,84 (0,05 - 1,5 \cdot 10^{-3} N_{1c} + 14 \cdot 10^{-6} N_{1c}^2) \times \\ &\quad \times [1,19 i_k + 0,038 i_k^2 \cdot V_a + 3,5 \cdot 10^{-3} (G_{a_c} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_c / \eta_{i_c}; \\ Q'_{\text{CSH}} &= 0,0548 \cdot 128 \cdot 0,84 (0,017 + 0,31 \cdot 10^{-3} N_{1c} + 2,47 \cdot 10^{-6} N_{1c}^2) \times \\ &\quad \times [1,19 i_k + 0,038 i_k^2 \cdot V_a + 3,5 \cdot 10^{-3} (G_{a_c} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_c / \eta_{i_c}; \end{aligned}$$

$$Q'_{c,NO_2} = 0,0548 \cdot 46 \cdot 0,84(0,02 + 2,3 \cdot 10^{-3} N_{1c} - 4 \cdot 10^{-6} N_{1c}^2) \times \\ \times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,5 \cdot 10^{-3}(G_{a,c} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_c / \eta_{i,c}. \quad (7)$$

Для автобуса з повним завантаженням:

$$Q'_{n,CO} = 1,289(0,05 - 1,5 \cdot 10^{-3} N_{1n} + 14 \cdot 10^{-6} N_{1n}^2) \times \\ \times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,15 \cdot 10^{-3}(G_{a,n} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_n / \eta_{i,n}; \\ Q'_{n,CH} = 5,892(0,017 + 0,31 \cdot 10^{-3} N_{1n} + 2,47 \cdot 10^{-6} N_{1n}^2) \times \\ \times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,15 \cdot 10^{-3}(G_{a,n} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_n / \eta_{i,n}; \\ Q'_{n,NO_2} = 2,117(0,02 + 2,3 \cdot 10^{-3} N_{1n} - 4 \cdot 10^{-6} N_{1n}^2) \times \\ \times [1,19i_k + 0,038i_k^2 \cdot V_a + 3,15 \cdot 10^{-3}(G_{a,n} \cdot \psi + 0,077kF \cdot V_a^2)] \alpha_n / \eta_{i,n}. \quad (8)$$

2. Аналіз результатів машинного експерименту по розрахункам шкідливих викидів для автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2.

Для оцінки впливу різних експлуатаційних факторів на величини викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса, що розглядається, визначення характеру цих залежностей і встановлення діапазону зміни значень цих показників був виконаний машинний експеримент на комп'ютері.

Результати розрахунків значень відсотка використання потужності N_1 , коефіцієнта надлишку повітря α та індикаторного ККД η_i для автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2 у спорядженому стані (С) та повною масою (П) G_a для різних швидкостей руху наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків N_1 та η_i для α автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2

V_a , км/год	20	30	40	50	60	70	80	90	100
N_{1c}	16,6	17,3	18,8	21,1	24,6	29,6	36,1	44,5	55,0
N_{1n}	21,3	21,9	23,2	25,3	28,5	32,9	38,8	46,3	55,7
$\alpha = 5 - 6,3 \cdot 10^{-2} N_1 + 2,8 \cdot 10^{-4} N_1^2$									
α_c	4,03	3,99	3,92	3,79	3,62	3,38	3,09	2,75	2,38
α_n	3,79	3,76	3,69	3,58	3,44	3,23	2,98	2,68	2,36
$\eta_i = 0,43 + 3 \cdot 10^{-3} N_1 - 3,2 \cdot 10^{-5} N_1^2$									
$\eta_{i,c}$	0,471	0,472	0,475	0,479	0,485	0,491	0,496	0,500	0,498
$\eta_{i,n}$	0,480	0,481	0,483	0,486	0,489	0,495	0,498	0,500	0,498

Результати розрахунків кількості шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2 при спорядженій та повній масі залежно від швидкості руху наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Результати розрахунків викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса Mercedes-Benz O530/Citaro C2

V_a , км/год	ψ	i_k	Кількість шкідливих речовин, г/км					
			$G_{a,c}=119584 \text{ Н}$			$G_{a,n}=171675 \text{ Н}$		
			CO	CH	NO ₂	CO	CH	NO ₂
20	0,040	3,055	7,67	31,95	28,73	6,30	37,46	36,64
30	0,027	2,037	5,10	21,97	20,19	4,06	25,71	25,35
40	0,020	1,527	3,51	17,50	16,13	2,73	19,88	19,86
50	0,016	1,222	2,52	14,93	14,54	1,82	16,87	17,40
60	0,013	1,018	1,60	13,57	13,93	0,97	15,16	16,13
70	0,011	0,873	0,74	13,15	14,26	0,26	14,35	15,80
80	0,010	0,764	-	13,61	15,43	-	14,57	16,53
90	0,009	0,679	-	14,71	16,80	-	15,03	17,45
100	0,008	0,611	-	15,15	18,24	-	15,85	18,53

На рис. 2-4 приведені графіки залежностей викидів шкідливих речовин від швидкості.

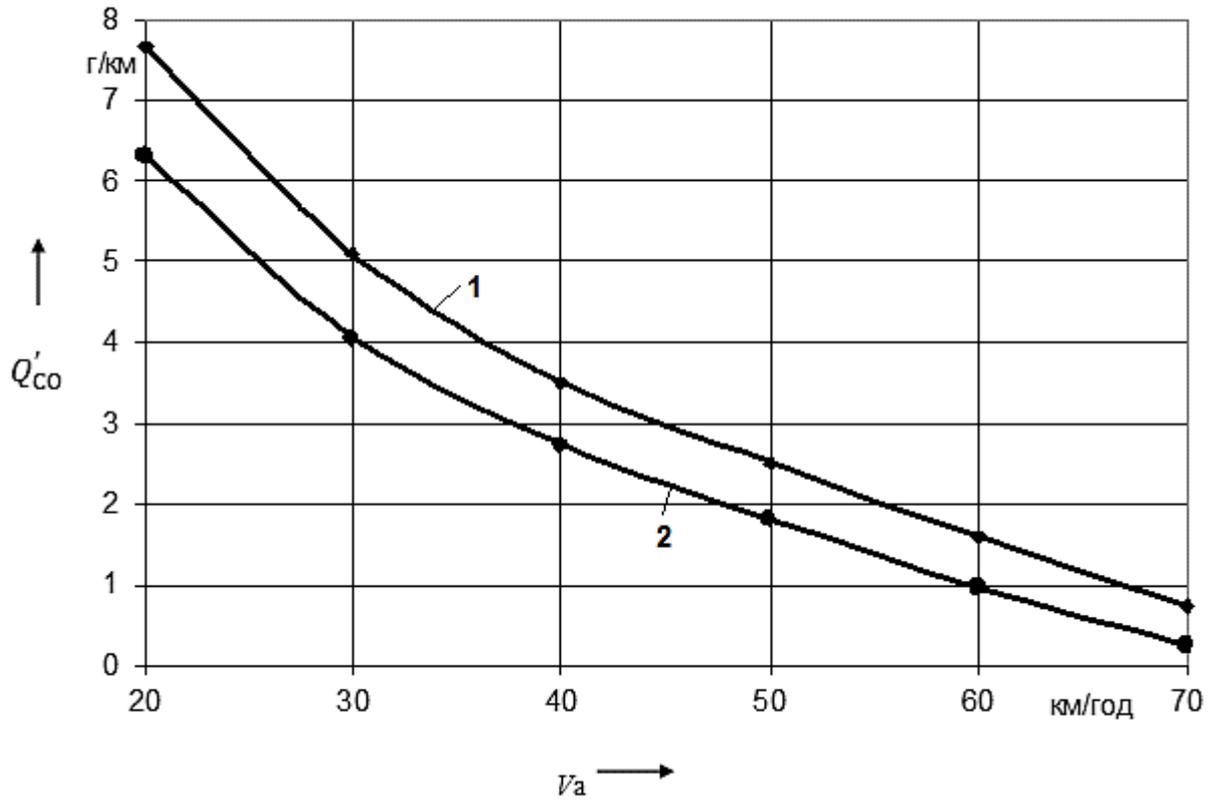


Рисунок 2 – Графік зміни викидів CO автобусом Mercedes при спорядженій (1) та повній (2) масі залежно від швидкості руху

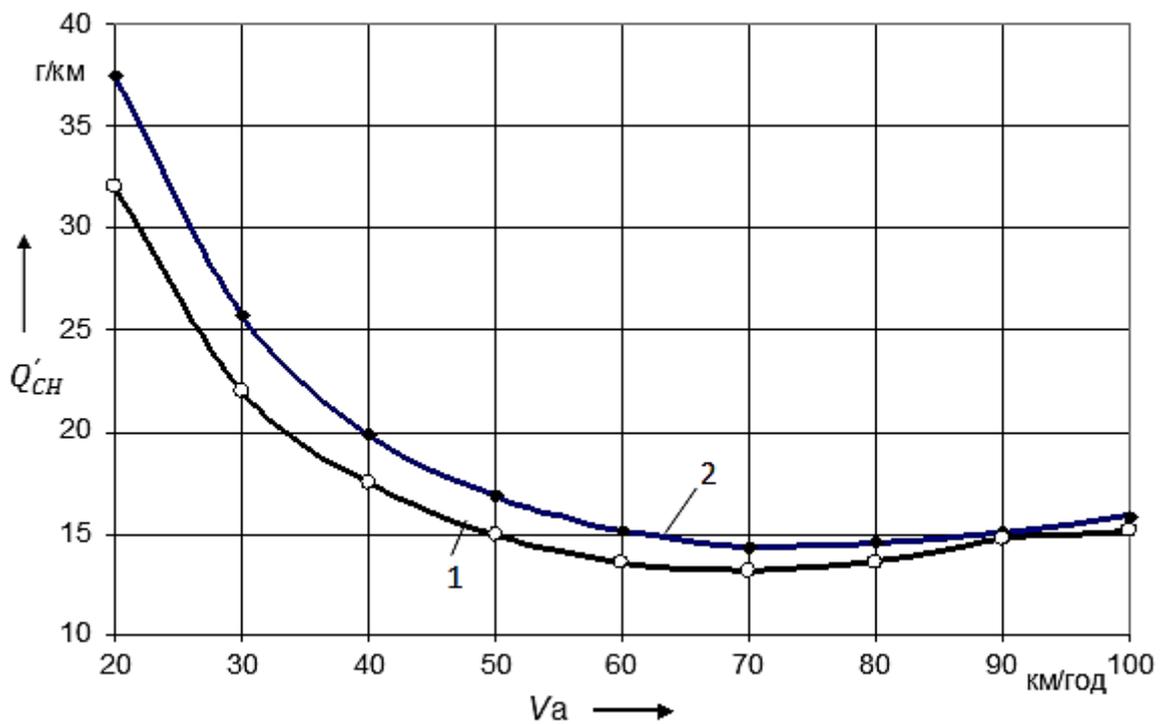


Рисунок 3 – Графік зміни викидів СН автобусом Mercedes при спорядженій (1) та повній (2) масі залежно від швидкості руху

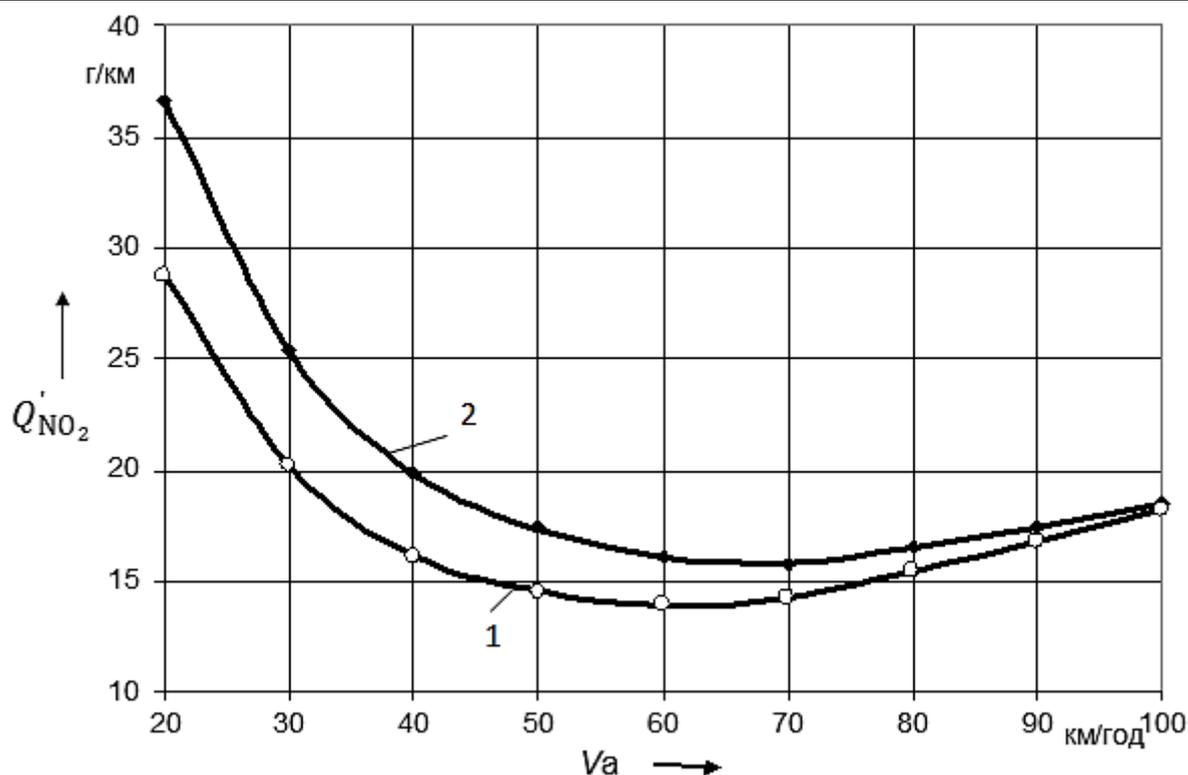


Рисунок 4 – Графік зміни викидів NO₂ автобусом Mercedes при спорядженій (1) та повній (2) масі залежно від швидкості руху

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз розрахункових даних показує, що максимальна кількість шкідливих речовин у відпрацьованих газах автобуса, що розглядається, міститься при його русі з невеликими швидкостями (20 км/год). Зі збільшенням швидкості вміст СО у відпрацьованих газах постійно знижується (в інтервалі дослідження), а вуглеводнів СН – знижується до V_а=70 км/год (як для спорядженого автобуса, так і з повним завантаженням), а потім дещо збільшується. Вміст діоксидів азоту NO₂ також має екстремальні значення: їх мінімум у автобуса без пасажирів становить при V_а=60 км/год, а з пасажирями – при V_а=70 км/год.

Завантаження автобуса пасажирями по-різному впливає на кількість викидів шкідливих речовин. Зі збільшенням швидкості руху відношення кількості СО у автобуса у спорядженому стані та з повним завантаженням постійно збільшується: з 1,217 до 2,846 г/км (при V_а=20...70 км/год). Аналогічне ставлення до СН: збільшується з 0,853 до 0,979 г/км (при V_а=20...90 км/год).

Зміна відношення кількості NO₂ у автобуса з повним завантаженням до спорядженого стану: зі збільшенням швидкості руху воно зменшується з 1,256 до 1,037 г/км (при V_а=30...90 км/год).

Таким чином, не можна давати однакові рекомендації для автобуса для зниження токсичності з усіх видів шкідливих речовин. Наприклад, якщо зниження СО можна досягати за рахунок збільшення завантаження пасажирями та підвищення швидкості руху, то зниження NO₂ і СН забезпечується при зменшенні завантаження автобуса. Для останнього випадку швидкісний режим має певні оптимальні величини: СН – V_{а опт} = 70 км/год, NO₂ – V_{а опт} = 60 км/год для спорядженого автобуса та 70 км/год для автобуса з повним завантаженням.

ВИСНОВКИ

1. Для визначення кількості шкідливих викидів з відпрацьованими газами розглянутого автобуса розроблено математичні моделі за окремими компонентами, що враховують конструктивні особливості автобуса та техніко-експлуатаційні показники його роботи.

2. Результати машинного експерименту показали, що математичні моделі правильно відображають закономірності зміни вихідних параметрів роботи автобусів від різних факторів, що характеризують їхню конструкцію, умови випробувань; підтвердили необхідність розробки уточнених нормативів щодо екологічної безпеки.

3. Остаточний вибір оптимальної швидкості руху для забезпечення зниження токсичності слід проводити з урахуванням ступеня небезпеки окремих шкідливих речовин та типу двигуна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Говорущенко, М.Я., Туренко, А.М. (1999). Системотехніка транспорту (на прикладі автомобільного транспорту). Харків: ХДАДТУ, 457 с.
2. Говорущенко, М.Я. (2011). Системотехніка автомобільного транспорту (розрахункові методи досліджень): монографія. Харків: ХНАДУ, 292 с.
3. Rymaniak, Ł., Daszkiewicz, P., Merksis, J., Kamińska, M. Methods of evaluating the exhaust emissions from driving vehicles. *Combustion Engines*. 2019, 179(4), 286-291. Doi: 10.19206/CE-2019-448. <https://surl.lu/akfbfj>.
4. Приміський, І.В., (2014). Нормування викидів відпрацьованих газів автомобілів та перехід до стандартів ЄВРО. Східноєвропейський журнал передових технологій, 4/11, 43-49. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_4%2811%29_8.
5. Запас ходу електромобіля: іздові цикли CLTC, NEDC, EPA, WLTP і JC08 – який правильний? URL: <https://surl.li/qntuad>.
6. José I. Huertas, Michael Giraldo, Luis F. Quirama and Jenny Díaz. Driving Cycles Based on Fuel Consumption. *Energies* 2018, 11, 3064; doi:10.3390/en11113064. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3064>.
7. Innovative Methods of Monitoring of Diesel Engine Exhaust Toxicity in Real Urban Traffic. URL: <https://surl.lu/kmyyzz>.
8. Klimenko, O. (2020). Dynamic variable volume sampling method for determining mass emissions of polluting substances with exhaust gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10) (105), 38-47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206679>.
9. Heinz Burtscher, W. Addy Majewski. Exhaust Gas Sampling and Conditioning. URL: https://dieselnet.com/tech/measure_sample.php.
10. Adam Majerczyk, Stanisław Radzimirski. (2013). Analysis of measurement errors of CVS method used for tests of pollutant emissions from light-duty vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 20, №. 4, 253-259. <https://surl.li/sjpfec>.
11. Zawiślak, M.; Molska, J.; Włostowski, R.; Włoka, A.; Świeściak, J.; Ostrowski, K. Assessment of the Actual Toxicity of Engine Exhaust Gas Emissions from Euro 3 and Euro 6 Compliant Vehicles with the BAT-CELL Method Using In Vitro Tests. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 14138. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114138>.
12. Aleksandra Kęska. The Actual Toxicity of Engine Exhaust Gases Emitted from Vehicles: The Development and Perspectives of Biological and Chemical Measurement Methods. *ACS Omega* 2023, 8, 24718–24726. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02171>.
13. Aleksandra Kęska, Michał Piotrowski, Radosław Włostowski, Natalia Szymlet. Cytotoxicity assessment of exhaust gases and analysis of volatile organic compounds emitted from a diesel engine. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(9), 385–392. <https://doi.org/10.12913/22998624/207435>.
14. Kęska A, Janicka A, Zawiślak M. Numerical optimization of the BAT-CELL Bio-Ambient-Tests method for engine exhausts toxicity evaluation. *Combustion Engines*. 2023; 192(1): 19-25. <https://doi.org/10.19206/CE-147781>.
15. Markus Hallsten, (2009). Methods for Measurement and Simulation of Fuel Consumption and Emissions on Heavy Duty Vehicles. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden. URL: <https://surl.li/fehvei>.
16. Kruczyński P., et al. Analysis of Selected Toxic Components in the Exhaust Gases of a CI Engine Supplied with Water-Fuel Emulsion. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 27, №. 1 (2018), 129-136. DOI: 10.15244/pjoes/74689. <https://surl.li/gynwez>.
17. Мармут, І., Шестов, С., & Чорний, І. (2024). Дослідження впливу дорожніх умов на ефективність використання автобусів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2(23), 169-179. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1539>.
18. Мармут, І.А., Кашканов, А.А., Кашканов, В.А., & Горбенко, О.С. (2023). Розробка нормативів витрат палива для міських автобусів та рекомендацій щодо ефективності їх використання. Вісник машинобудування та транспорту, 17(1), 99-107. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-99-107>.

REFERENCES

1. Govorushchenko M., Turenko A. (1999). Systemotekhnika transportu (na prykladі avtomobilnoho

- transportu). [Transport systems engineering (using the example of road transport)]. Kharkov: KhSARTU [in Ukrainian].
2. Govorushchenko M. (2011). Systemotekhnika avtomobilnoho transportu (rozrakhunkovi metody doslidzhen). [Road transport systems engineering (computational research methods)]. Monograph. Kharkov: KhNAHU [in Ukrainian].
 3. Rymaniak, Ł., Daszkiewicz, P., Merksiz, J., Kamińska, M. Methods of evaluating the exhaust emissions from driving vehicles. *Combustion Engines*. 2019, 179(4), 286-291. Doi: 10.19206/CE-2019-448. <https://surl.lu/akfbfj>.
 4. Prymiski I. (2014). Normuvannia vykydiv vidpratsovanykh haziv avtomobiliv ta perekhid do standartiv YeVRO. [Regulation of vehicle exhaust emissions and transition to EURO standards]. *Skhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. European Journal of Enterprise Technologies, 4/11, 43-49. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2014_4%2811%29_8.
 5. Zapas khodu elektromobilia: yizdovi tsykly CLTC, NEDC, EPA, WLTP i JC08 – yakyi pravylnyi? [Electric vehicle range: CLTC, NEDC, EPA, WLTP and JC08 driving cycles – which one is correct?]. [in Ukrainian]. URL: <https://surl.li/qntuad>.
 6. José I. Huertas, Michael Giraldo, Luis F. Quirama and Jenny Díaz. Driving Cycles Based on Fuel Consumption. *Energies* 2018, 11, 3064; doi:10.3390/en11113064. <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3064>.
 7. Innovative Methods of Monitoring of Diesel Engine Exhaust Toxicity in Real Urban Traffic. URL: <https://surl.lu/kmyyzzr>.
 8. Klimenko, O. (2020). Dynamic variable volume sampling method for determining mass emissions of polluting substances with exhaust gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10) (105), 38-47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206679>.
 9. Heinz Burtscher, W. Addy Majewski. Exhaust Gas Sampling and Conditioning. URL: https://dieselnet.com/tech/measure_sample.php.
 10. Adam Majerczyk, Stanisław Radzimirski. (2013). Analysis of measurement errors of CVS method used for tests of pollutant emissions from light-duty vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 20, №. 4, 253-259. <https://surl.li/sjpfec>.
 11. Zawiślak, M.; Molska, J.; Włostowski, R.; Włoka, A.; Świeściak, J.; Ostrowski, K. Assessment of the Actual Toxicity of Engine Exhaust Gas Emissions from Euro 3 and Euro 6 Compliant Vehicles with the BAT-CELL Method Using In Vitro Tests. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 14138. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114138>.
 12. Aleksandra Kęska. The Actual Toxicity of Engine Exhaust Gases Emitted from Vehicles: The Development and Perspectives of Biological and Chemical Measurement Methods. *ACS Omega* 2023, 8, 24718–24726. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02171>.
 13. Aleksandra Kęska, Michał Piotrowski, Radosław Włostowski, Natalia Szymlet. Cytotoxicity assessment of exhaust gases and analysis of volatile organic compounds emitted from a diesel engine. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, 19(9), 385–392. <https://doi.org/10.12913/22998624/207435>.
 14. Kęska A, Janicka A, Zawiślak M. Numerical optimization of the BAT-CELL Bio-Ambient-Tests method for engine exhausts toxicity evaluation. *Combustion Engines*. 2023; 192(1): 19-25. <https://doi.org/10.19206/CE-147781>.
 15. Markus Hallsten, (2009). Methods for Measurement and Simulation of Fuel Consumption and Emissions on Heavy Duty Vehicles. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden. URL: <https://surl.li/fehvei>.
 16. Kruczyński P., et al. Analysis of Selected Toxic Components in the Exhaust Gases of a CI Engine Supplied with Water-Fuel Emulsion. *Pol. J. Environ. Stud*. Vol. 27, №. 1 (2018), 129-136. DOI: 10.15244/pjoes/74689. <https://surl.li/gynwez>.
 17. Marmut, I., Shestov, S., & Chorny, I. (2024). Doslidzhennia vplyvu dorozhnikh umov na efektyvnist vykorystannia avtobusiv. [Study of the influence of road conditions on the efficiency of bus use]. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni ta transporti*. Modern technologies in mechanical engineering and transport, 2(23), 169-179. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1539>.
 18. Marmut, I, Kashkanov, A., Kashkanov, V., & Horbenko, O. (2023). Rozrobka normatyviv vytrat palyva dlia miskykh avtobusiv ta rekomendatsii shchodo efektyvnosti yikh vykorystannia. [Development of fuel consumption standards for city buses and recommendations regarding the efficiency of their use]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. Bulletin of mechanical engineering and transport, 17(1), 99-107.

[in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-99-107>.

I. Marmut, V. Bezridnyi. Mathematical models for calculating toxic emissions of a bus with a diesel engine.

An integral part of the general problem associated with improving the design of manufactured cars, maintaining them in working condition, the quality of fuel, lubricants and their economy, improving the road network and organizing the movement of transport vehicles, is their toxicity.

Many researchers have been working on issues of saving fuel and energy resources and reducing engine toxicity, and currently there are a significant number of relevant recommendations. However, simple and fairly effective proposals have yet to be developed.

The task of optimizing the operation of passenger vehicles, taking into account environmental safety, is one of the components of human regulatory activity aimed at improving the urban environment. Thus, reducing harmful emissions from car engines is the most important public and social problem.

When solving this problem, the preferred directions are those whose implementation is accompanied by savings in fuel and other material and technical resources. Known technical solutions for reducing harmful substances in engine exhaust gases are usually associated with changing their designs (this requires significant costs) or using expensive auxiliary devices to neutralize harmful substances (their installation on a car is often accompanied by a deterioration in engine efficiency). In this regard, it is advisable to primarily influence those factors that allow reducing harmful emissions from vehicles (and, accordingly, fuel consumption) during transport work.

The article develops mathematical models for calculating toxic emissions from buses with diesel engines. The results of a machine experiment on calculating harmful emissions using the example of a Mercedes-Benz O530/Citaro C2 bus are also analyzed.

One of the directions for increasing the fuel efficiency and environmental safety of buses is the practical use of rational driving modes. This allows us to consider the article aimed at increasing the efficiency of technical operation of cars by saving fuel and reducing toxicity as relevant.

Keywords: bus, operating conditions, harmful emissions, environmental safety, mathematical models, speed.

МАРМУТ Ігор Арнольдович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. М.Я. Говорущенка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: mia2005.62@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

БЕЗРІДНИЙ Володимир Володимирович, старший викладач кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. М.Я. Говорущенка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: rostik405220@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4825-3213>.

Ihor MARMUT, Ph. D. in Engineering, Associate Professor of Motor Vehicle Transport Systems Engineering Department named after M.Ya. Govorushchenka, Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: mia2005.62@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4661-1336>.

Volodymyr BEZRIDNYI, senior teacher of Motor Vehicle Transport Systems Engineering Department named after M.Ya. Govorushchenka, Kharkov National Automobile and Highway University, e-mail: rostik405220@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4825-3213>

Дата надходження статті до видання: 21.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.11.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1929