

**Колодницька Р.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ З ВРАХУВАННЯМ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Зменшення витрати палива і шкідливих викидів від автомобільного транспорту – одна із ключових проблем сьогодення. Ще одна проблема, яка потребує негайного вирішення – це зменшення залежності від російської нафти. Одним із самих небезпечних палив, використання якого обмежується в Європі, є дизельне паливо, яке канцерогенне і має високі викиди сажі та оксидів азоту. Для автомобілів, що використовують альтернативний вид палива потрібні моделі, що дають можливість розрахувати витрату палива, а також шкідливі викиди. В Європі найбільш популярним паливом для заміни дизельного палива є біодизель (біодизельне паливо, дизельне біопаливо). Одним із недоліків біодизеля є велика в'язкість палива, що впливає на його розпилення, а також вищі викиди оксидів азоту. Зараз в якості заміни дизельного палива набирає популярності відновлювальне паливо (*renewable diesel*), що має меншу в'язкість, ніж біодизель. В роботі виконано аналіз моделей для підрахунку витрати палива та викидів від автомобільного транспорту. Найбільш перспективною моделлю для розрахунку витрати палива вважається СМЕМ (*Comprehensive Modal Emissions Model*, Комплексна модальна модель викидів), що розроблена в США. Модель СМЕМ складається з шести основних модулів, які використовують такі вхідні дані: потужність двигуна, швидкість двигуна, співвідношення повітря/палива, використання палива та характеристики каталізатора.

В даній роботі було проаналізовано витрата палива та шкідливі викиди, що підраховані у програмі СМЕМ для різних типів автомобілів для вісьми різних циклів за різними категоріями. Показана залежність викидів оксидів азоту транспортних засобів від витрати палива, що підраховані за допомогою СМЕМ. Було показано, що значення викидів оксидів азоту в залежності від витрати палива для легкових автомобілів з ТВС групуються подібним чином для однакових циклів. Викиди  $NO_x$  для розглянутих циклів показують лінійну залежність від витрати палива тільки для однієї категорії автомобілів: Tier 1 >50К миль, мала потужність. Проаналізовано можливість використання моделі СМЕМ для моделювання витрати дизельного біопалива.

Одна із переваг СМЕМ це можливість взаємодії з транспортними моделями та базою даних з перевезень. Проаналізовано використання транспортних технологій (програма VISSIM) для покращення моделювання витрати палива. Використання нової версії VISSIM (2022 р.) разом з базами даних українських доріг дасть можливість покращити точність прогнозування як витрати палива, так і викидів. Темою подальших досліджень можуть стати експерименти з використанням суміші біодизеля і відновлювального палива з застосуванням методу нейронних мереж для моделювання витрати палива автомобільних транспортних засобів.

**Ключові слова:** СМЕМ, витрата палива, транспортні технології, дизельне біопаливо, шкідливі викиди, оксиди азоту, VISSIM.

### Постановка проблеми.

Зменшення витрати палива і шкідливих викидів від автомобільного транспорту – одна із ключових проблем сьогодення. Ще одна проблема, яка потребує негайного вирішення – це зменшення залежності від російської нафти. Одним із самих небезпечних палив, використання якого обмежується в Європі, є дизельне паливо, яке канцерогенне і має високі викиди сажі та оксидів азоту. Для автомобілів, що використовують альтернативний вид палива потрібні моделі, що дають можливість розрахувати витрату палива, а також

шкідливі викиди. В Європі найбільш популярним паливом для заміни дизельного палива був біодизель (біодизельне паливо, дизельне біопаливо). Одним із недоліків біодизеля є велика в'язкість палива, що впливає на його розпилення, а також вищі викиди оксидів азоту. Зараз в якості заміни дизельного палива набирає популярності відновлювальне паливо (*renewable diesel*). Дизельне біопаливо має більшу густину і в'язкість, ніж дизельне паливо, але меншу теплоту згоряння. Відновлювальне паливо має меншу густину, ніж дизельне паливо і меншу в'язкість, ніж біодизель.

Як правило, витрату палива і викиди від двигунів автомобільного транспорту вимірюють експериментально. Але застосування нових альтернативних палив потребує використання моделювання для швидкого вибору найбільш оптимального палива. Моделювання викидів біодизельного палива досить широко досліджено, але моделювання витрати альтернативних палив досліджено ще недостатньо. Причому, для підвищення точності моделювання витрати палива в реальних умовах руху транспорту потрібно врахування зупинок транспорту і режиму роботи світлофорів, що є предметом вивчення транспортних технологій.

**Метою статті є** аналіз моделей витрати палива в застосуванні до дизельних біопалив з врахуванням транспортних технологій.

#### **Аналіз останніх досліджень.**

Найбільш детальна інформація щодо моделей витрати палива приведена в роботі [1], де моделі витрати палива розкладені в три віртуальні ящики: білий чорний і сірий. Самою популярною моделлю чорного ящика є комплексна модальна модель викидів (СМЕМ), яка широко використовується в моделюванні руху ТЗ. Найбільш популярною моделлю витрати палива в Україні є модель проф. М.Я. Говорушенка. Застосування цієї моделі до дизельного біопалива дає гарні результати і описано в [2]. На жаль, моделі Говорушенка не враховують витрату палива автомобілем в реальних умовах міста для реальних транспортних засобів (ТЗ), але ця проблема вирішена використанням програми СМЕМ [3,4]. Метод нейронних мереж використовувався в [5] для підрахунку витрати палива автомобільного транспорту. Властивості різних альтернативних палив і їх сумішей, а також моделювання випаровування палив, включаючи біодизельне паливо, детально описано в [6]. Моделювання шкідливих викидів від використання біодизельного палива описано в [2]. Викиди оксидів азоту від роботи дизельного двигуна на біопаливі, як для стаціонарного двигуна, так і автомобільного двигуна описані в роботі [7]. Моделювання розпилювання дизельного біопалива детально описано в [8], але вплив параметрів розпилювання палива на його витрату все ще залишається недослідженим. Моделювання затримки займання для біодизельного палива описано в [9], що впливає у великій мірі на викиди оксидів азоту. Робота [10] присвячена аналізу моделей витрати палива. В керівництві для користувача [11] детально описана версія 3.01 програми СМЕМ для під-

рахунку витрати палива ТЗ, які використовують як бензин так і дизельне паливо. У дослідженнях [12] програма СМЕМ була застосована для розрахунку миттєвих даних про витрату палива та викиди транспортних засобів. Були також підраховані коефіцієнти витрати палива та викидів на основі аналізу миттєвих даних з врахуванням різних типів доріг і погодних умов. Після цього нейронні мережі і нелінійні методи регресії були застосовані для вивчення і прогнозування витрати палива і викидів. Нарешті, для аналізу продуктивності були зіставлені та оцінені результати, передбачені методом нейронних мереж та звичайним нелінійним методом регресії.

### **1. Моделі витрати палива.**

**1.1. Моделі витрати палива «Білий ящик» (White-box fuel consumption models).** Ці моделі побудовані на основі фізичних або хімічних процесів в двигуні, тобто з використанням математичних формул для описання процесів впуску двигуна, стиснення, згоряння і вихлопу газів. Основними моделями цього типу є *метод балансу вуглецю* та *феноменологічна модель середнього значення*. Відома модель витрати палива японського вченого Неуwood, який розвинув *феноменологічну модель* для знаходження середнього значення витрати палива. Застосування цієї моделі до дизельного біопалива можна знайти в [2].

Основним принципом *методу балансу вуглецю* є закон збереження маси [1]. Для автомобілів з дизельним паливом витрата палива може бути знайдена:

$$Q = 0.1155 / \rho_f (0.886HC + 0.429CO + 0.273CO_2), \quad (1)$$

де  $Q$  (л/100 км) – витрата палива; HC (г/км) – викиди вуглеводнів; CO (г/км) – викиди монооксиду вуглецю; CO<sub>2</sub> (г/км) – викиди вуглекислого газу;  $\rho_f$  (кг/л) – густина палива за 288 К.

Біодизельне паливо має більшу густину у порівнянні з дизельним паливом і, як правило, вищі викиди оксиду азоту і менші викиди сажі. Експериментальні дослідження показують, що біодизельне паливо має трішки більшу витрату палива, ніж дизельне паливо.

**1.2. Моделі витрати палива «Чорний ящик» (Black-box fuel consumption models).** У цих моделях весь автомобіль або його двигун вважається чорним ящиком. Ці моделі, як правило, засновані на експериментальних даних, не містять багато фізичного пояснення, що робить їх чисто математичними моделями. Виходячи з вхідних даних, існує три типи моделей: (1) моделі витрат палива на основі двигуна; (2) моделі витрат палива на

базі ТЗ; (3) модальні моделі витрати палива. Прикладом моделі (2) може бути модель СМЕМ.

## 2. Модель СМЕМ

Модель СМЕМ (Comprehensive Modal Emissions Model, Комплексна модальна модель викидів) розроблена Каліфорнійським та Мічиганським університетами сумісно з Національною лабораторією Лоуренса Берклі (Lawrence Berkeley). Третя версія СМЕМ [4] включає в себе розрахунок 28 легкових і 3 вантажних автомобілів. На даний момент це найбільш доступна, детальна і найкраще перевірена модель для оцінки викидів вихлопних газів ТЗ з різними швидкостями і прискореннями. Модель СМЕМ складається з шести основних модулів, які використовують такі вхідні дані: потужність двигуна, швидкість двигуна, співвідношення повітря/палива, використання палива та характеристики каталізатора. Дані для моделювання були зібрані за допомогою експериментальних досліджень, використовуючи 300 реальних автомобілів.

**2.1. Модель витрати палива в програмі СМЕМ.** У СМЕМ викиди  $Q$  з вихлопної труби автомобіля (tailpipe emissions) розраховуються як добуток трьох компонентів: паливної швидкості, індексу викидів двигуна та залежної від часу частки проходження каталізатора (catalyst pass fraction, CPF):

$$Q = FR \times EI \times CPF, \text{ (г/с)}, \quad (1)$$

де  $FR$  – (fuel use rate) швидкість використання палива, г/с;  $EI$  (індекс викидів двигуна) – відношення маси викидів двигуна до маси спожитого палива ( $g_{\text{emission}} / g_{\text{fuel}}$ );  $CPF$  – частка проходження каталізатора, яка визначається як відношення викидів з вихлопної труби до викидів двигуна.

Специфіка програми СМЕМ заключається в розробці концепції так названого *композитного* ТЗ [3, таблиця 4.1, стор. 117]. *Композитний* ТЗ (у кожній категорії) визначається на основі зваженого середнього показника викидів усіх ТЗ, протестованих у цій категорії. Загальні параметри моделюються, як частина моделі викидів композитного ТЗ.

## 2.2. Витрата палива для дизельного палива.

Для дизельного палива швидкість використання палива можна підрахувати наступним чином [3, с. 156], [10, с. 48]:

$$FR = \left( kNV + \frac{P}{\eta} \right) \frac{1}{43.2} \left( 1 + b_1 (N - N_0)^2 \right), \quad (2)$$

$$K = k_o \left( 1 + C(N - N_0) \right),$$

$$N_0 = \sqrt{3.0/V},$$

де  $FR$  – витрата палива (г/с);  $K$  – коефіцієнт тертя двигуна;  $N$  – швидкість обертів двигуна (об/с);  $V$  – робочий об'єм двигуна (літр);  $P$  – потужність двигуна (кВт);  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

В програмі СМЕМ (версія 3.01) за змовчуванням прийняті наступні параметри [10, с. 48]:  $\eta \approx 0,45$  – індикаторний ККД двигуна;  $b_1 \approx 10^{-4}$ ;  $C \approx 0,00125$ ;  $43,2$  кДж/г – нижча теплота згоряння дизельного палива. Для дизельного біопалива у формулу (2) має бути включена нижча теплота згоряння для біопалива, що залежить від типу біопалива.

В роботі [3, стор. 152- 153, табл. 4.4] приведені значення коефіцієнтів  $k_o$  для кожної з категорій ТЗ, що представляє втрату енергії, що пов'язана з тертям двигуна на одиницю оберту двигуна і робочий об'єм двигуна. Для ТЗ, в яких використовуються більш «старі» технології (категорії 2, 3 і 13); для автомобілів з високим рівнем викидів та для ТЗ з новішими технологіями (категорії 4, 8, 15 і 17) значення коефіцієнтів  $k_o$  змінюються в таких межах  $k_o \approx 0,25$ ;  $k_o \sim 0,23 - 0,27$ ;  $k_o \sim 0,20 - 0,22$  кДж/(об/с×л), відповідно.

**2.3. Моделювання шкідливих викидів від роботи двигуна.** Викиди  $NO_x$  двигуна дуже чутливі до піку температур, що виникають в циліндрі. У зв'язку з цим існує гранична витрата палива (fuel rate threshold), нижче якої викиди дуже низькі. Викиди двигунів, як правило, також значно збільшуються під час холодного старту, особливо викиди  $CO$  та  $HC$ .

*Шкідливі викиди від роботи дизельного двигуна.* Шкідливі викиди від роботи дизельного двигуна в моделі СМЕМ можна визначити в залежності від  $FR$  [3, стор. 156-157]:

$$CO = a_{CO}FR + C_0, \text{ (г/с)}; \quad (3)$$

$$HC = a_{HC}FR + r_{HC}, \text{ (г/с)}; \quad (4)$$

$$NO_x = a_{NO}FR + r_{NO}, \text{ (г/с)}; \quad (5)$$

де  $a_{CO}$ ,  $C_0$ ,  $a_{NO}$ ,  $r_{NO}$ ,  $a_{HC}$ ,  $r_{HC}$  – коефіцієнти.

Для визначення вищеприведених коефіцієнтів був проведений регресійний аналіз викидів дизельного палива в залежності від  $FR$  для дизельних вантажівок з використанням двох циклів FTP та MEC01. Характеристики циклів FTP і MEC01 приведені в [3, стор. 106]. Для вантажівки Ford F-250 PU в роботі [3, с. 158] було знайдено наступні значення коефіцієнтів:  $a_{NO} = 0,0081$ ,  $r_{NO} = 0,0087$  з точністю  $R2 = 0,7266$ . Середні значення коефіцієнтів для дев'яти вантажівок складають:  $a_{NO} = 0,0314$ ,  $r_{NO} = 0,0032$ ,  $R2 = 0,8274$ .

#### 2.4. Перевірка моделі СМЕМ.

Модель СМЕМ була перевірена з використанням дизельного палива для вантажівок легкої і середньої ваги (категорія 40) з модальним циклом викидів (MEC01). Характеристики шести вантажівок марки Ford з двигуном Navistar V8, що використовувались для моделювання витрати палива та викидів в програмі СМЕМ, показані в таблиці 1 [3, с. 154].

В таблиці 1 використані такі позначення: HP – номінальна потужність двигуна (rated engine power), к.с.; Np – швидкість двигуна за номінальної потужності, об/хв; Tmax – максимальний крутний момент двигуна; Nm – швидкість двигуна за максимального крутного моменту, об/хв; Trlhp – коефіцієнт пробігу (coastdown coefficient); відношення N/U – (об/хв)/(миль/год) для верхньої передачі.

В таблиці 2 приведені вимірні значення димності (ODOM), а також викиди вуглеводнів HC, CO, NOx та вимірня економія палива (MPG, miles per gallon,) шести автомобілів марки FORD [3, стор.154].

MPG є основним показником паливної економичності автомобіля: чим вище MPG автомобіля, тим він більш економічний. MPG представляє відстань, що виміряна в милях, яку автомобіль може проїхати на галоні палива.

Для композитного ТЗ категорії 40 було одержано  $V = 6,6$  л;  $Trlhp = 20,7$  кс;  $k_o = 0,135$  [3, с. 153]. Для вантажівки FORD F-250 PU для дизельного палива, використовуючи рівняння (2), одержуємо  $FR = 11,932$  г/с. За рівнянням (5) розраховуємо

викиди оксидів азоту, що складають 0,111 г/с для цього ж ТЗ.

В наступному підрозділі наведені характеристики деяких циклів і описана інтеграція моделей викидів і моделей транспортування.

#### 2.5. Інтеграція моделей транспортування і моделей викидів в СМЕМ

Одна із переваг СМЕМ це можливість взаємодії з транспортними моделями та базою даних з перевезень. Для транспортного руху на автостраді в [3] було проаналізовано шість циклів водіння: від високошвидкісного водіння (LOS A+), де ТЗ мало або взагалі не взаємодіють з іншими ТЗ до водіння в так названих «умовах ближнього блокування» (LOS F). Довжина циклу коливалася від 4 до 12 хвилин, і цикли були побудовані таким чином, щоб оптимально відповідати спостережуваному прискоренню та іншим характеристикам. Характеристики циклу включають також максимальну питому енергію:  $K_{max} = 2Ua$ , що представляє собою подвоєний добуток швидкості ТЗ на його прискорення.

Загальні характеристики деяких циклів наведені в таблиці 3.

В таблиці 4 наведено результати розрахунків витрати палива та викидів за допомогою програми СМЕМ [2] для автостради, цикл LOS A+ (див.Табл. 3).

В даній роботі були проаналізовані витрата палива та шкідливі викиди, що підраховані у програмі СМЕМ для різних типів автомобілів для циклу автострада LOS A+ та інших циклів, що

Таблиця 1

Експериментальні дані автомобілів марки Ford

Марка	Об'єм, л	*Вага ТЗ	HP, к.с.	Np, об/хв	Tmax	Nm, об/хв	Trlhp	N/V
F-350 4x4	7.3	7000	210	3000	425	2000	21.9	31.3
F-250 TB PU	6.9	6600	180	3300	345	1400	21.0	31.3
F-250 PU	6.9	6600	180	3300	345	1400	18.0	31.3
F-350 4x4	7.3	7600	210	3000	425	2000	21.9	31.3
F-350 4x2	6.9	7500	180	3300	345	1400	21.0	31.3
F-350 4x2	6.9	6600	180	3300	345	1400	18.0	31.3

\*Вага ТЗ показана у фунтах (lb)

Таблиця 2

Вимірні характеристики автомобілів марки FORD

Марка автомобіля	ODOM (миля)	HC (г/милю)	CO (г/милю)	NOx (г/милю)	MPG (миля/галон)
F-350 4x4	37533	2.01	0.96	7.01	18.1
F-250 TB PU	81898	1.35	0.52	6.49	16.4
F-250 PU	61283	1.70	0.64	4.20	16.5
F-350 4x4	39844	1.27	0.55	4.57	17.1
F-350 4x2	72684	1.06	0.65	7.21	14.1
F-350 4x2	72426	2.38	0.95	6.63	16.1

Загальні характеристики циклів

N	Цикл	Середня швидкість миль/год	Максимальна швидкість миль/год	Макс. прискорення (миль/год)/с	Подовженність (с)	Довжина (мілі)	$K_{max}$ (миль/год) <sup>2</sup> / с
1	LOS A+	63.2	74.7	2.7	610	10.72	357
2	LOS A-C	59.7	73.1	3.4	516	8.55	307
3	LOS D	52.9	70.6	2.3	406	5.96	233
4	LOS E	30.5	63.0	5.3	456	3.86	227
5	LOS F	18.6	49.9	6.9	442	2.29	215
6	LOS F-	13.1	35.7	3.8	390	1.42	99
7	ART EF	11.5	39.9	5.8	504	1.62	180
8	LOCAL	12.8	38.3	3.7	525	1.87	132

Таблиця 4

Витрата палива та викиди ТЗ для циклу: автострада LOS A+.

N	Автострада, цикл LOS A+		Грам/мілі			
	Категорія автомобіля		Витрата палива	CO	CH	NOx
	<i>Легкові автомобілі</i>					
8	Tier 1, >50K* миль, мала потужність/вага		84.0	4.88	0.07	0.11
9	Tier 1, >50K миль, велика потужність/вага		79.5	3.40	0.06	0.28
10	Tier 1, < 50K миль, мала потужність/ вага		82.4	4.08	0.06	0.21
11	Tier 1, < 50K миль, велика потужність/ вага		91.7	3.95	0.05	0.15
24	Tier 1, >100K мілі		95.9	6.84	0.19	0.21
	<i>Вантажівки</i>					
25	Бензиновий двигун, **LDT(> 8500 GVW)		186.2	4.92	0.16	2.38
40	Дизельний двигун, LDT (> 8500 GVW)		114.2	0.97	0.42	3.79
	<i>ТЗ з високим рівнем викидів</i>					
19	Бідна суміш		111.1	9.83	0.64	2.45
20	Багата суміш		97.2	24.39	1.73	1.38
21	Неповне згорання		105.9	27.75	2.55	0.61
22	Неякісний каталізатор		116.6	21.15	3.19	2.62
23	Дуже багата суміш		123.0	106.60	3.48	0.53

\*50K миль = пробіг 50000 миль; \*\* LDT (light duty truck) – вантажівка з малою вантажопідйомністю; GVW (Gross Vehicle Weight) – значення, вказане виробником, як максимальна вантажопід'ємність ТЗ.

показані в табл. 3 за категоріями, які відображені в табл. 4. На рис. 1 показані викиди оксидів азоту в залежності від витрати палива для легкових автомобілів з TWC (three-way catalytic converters, трикомпонентний каталітичний нейтралізатор) для циклів 2 – 6 (див. табл. 3) та з Tier 1 (>50K миль, низька потужність/вага) у порівнянні з локальним циклом (категорії 8, 9, 10, 11, 24). Як видно з рис. 1, значення викидів оксидів азоту в залежності від витрати палива для легкових автомобілів з TWC групуються подібним чином для однакових циклів. Аналіз показав, що викиди NOx для розглянутих циклів показують лінійну залежність від витрати палива тільки для однієї категорії автомобілів: Tier 1 >50K миль, мала потужність/вага (Tier 1, >50 K, low).

Автори [11] вважають, що формування викидів NOx в дизельних двигунах залежить в осно-

вному від наявності достатньої кількості кисню і високої температури. Відомо, що при випробуваннях автомобілів з дизельними двигунами на викиди NOx, ряд автомобільних компаній, наприклад, Volkswagen, використовували спеціальні комп'ютерні програми, для того щоб уникнути відображення великих викидів оксидів азоту. Цей обман був виявлений в 2018 році, що привело до великих штрафів не тільки цій компанії, а також іншим, що використовували подібні методи. Через те саме викидам азоту приділено найбільше уваги в даній роботі, і формули (2) та (5), які використовуються в програмі СМЕМ потребують додаткових досліджень і порівняння з іншими моделями.

### 3. Розрахунки викидів оксидів азоту

Моделювання викидів оксидів азоту – одна із самих актуальних задач сьогодення, особливо в застосуванні до біопалива. В роботі [7, с. В64]

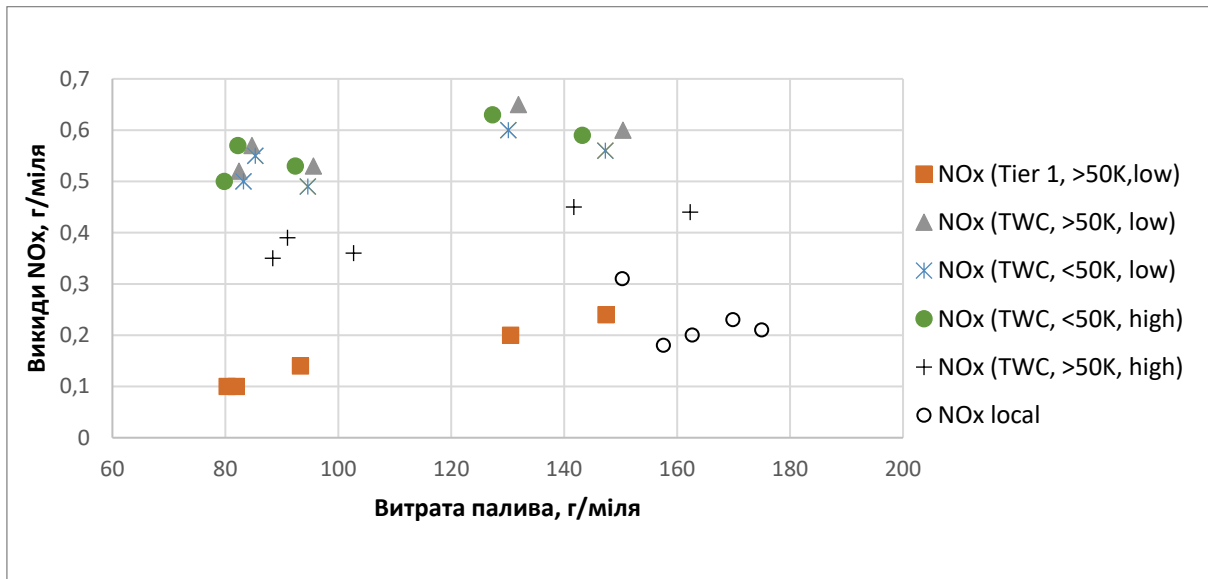


Рис. 1. Залежність викидів оксиду азоту від витрати палива для легкових автомобілів з TWC та Tier 1 (>50К миль, низька потужність/вага) для циклів 2-6, що показані в табл. 3, у порівнянні з локальним циклом LOCAL (NOx local)

викиди оксидів азоту для дизельного палива та біопалива на холостому ході представлені наступними рівняннями.

Для стаціонарного двигуна (ppm):

$$NEI = 20956.69 \times \rho_f \cdot \exp(0.948 \cdot ID - 18.83) \cdot \exp(4626.44 / T_f), \quad (8)$$

де  $\rho_f$  – густина палива [кг/м<sup>3</sup>];  $ID$  – затримка займання палива [мс];  $T_f$  – температура полум'я [K].

Для автомобільного двигуна (ppm):

$$NEI = 20956.69 \times \rho_f \cdot \exp(2.9 \cdot ID - 19.627) \cdot \exp(4626.44 / T_f) \quad (9)$$

В формулах (11) та (12) викиди від двигунів представлені в мільйонних долях (part per million, ppm).

Ще одна проблема, яка не враховується в вищеприказаних моделях це врахування зупинок ТЗ під час руху.

#### 4. Моделювання витрати палива ТЗ з врахуванням роботи світлофорів.

Одним із способів зменшення руху транспорту на міських вулицях є оптимізація часу сигналу світлофора. Формула, що використовується для розрахунку витрати палива у програмах VISSIM та TRANSYT-7F [4]:

$$F = TT \times k_1 + TD \times k_2 + ST \times k_3 \quad (\text{галони}) \quad (10)$$

де  $F$  – витрата палива (галони);  $TT$  (total travel) – кількість ТЗ, помножене на відстань (veh×mi);  $TD$  (total delay) – загальна затримка сигналу (год);  $ST$  (stop) – загальна кількість зупинок ТЗ (ТЗ / год);  $k_1$ ,  $k_2$  та  $k_3$  – коефіцієнти.

Коефіцієнти можна підрахувати за наступними залежностями:

$$k_1 = 0.075283 - 0.0015892U + 0.000015066U^2;$$

$$k_2 = 0.7329; \quad k_3 = 0.0000061411U^2,$$

де  $U$  – швидкість ТЗ (миль / год).

В цілому, як відмічено в [4], витрата палива, що визначається за допомогою програми VISSIM, має великі похибки у порівнянні з витратою палива у SMEM. Витрата палива, що підрахована у VISSIM, повинна бути нижчою, ніж у SMEM, оскільки VISSIM рахує витрату палива у межах вузлів навколо перехресть. Дослідження показали, що витрата палива розрахована за допомогою VISSIM, має більші значення, ніж у програмі SMEM. В останній версії VISSIM (2022 р.) була впроваджена нова програма для аналізу викидів, розробником якої є компанія Bosch. Прогнозування викидів з використанням Bosch достатньо точне тільки для європейських країн, характеристики доріг яких є в базі даних. Так, викиди NOx для цих країн прогнозуються з точністю > 85%, викиди CO<sub>2</sub> прогнозуються з точністю більше, ніж 98% у тесті з реальним автомобілем.

На жаль, наші дослідження показують, що навіть нові версії програми з використанням транспортних технологій не дають можливість точно підрахувати викиди та витрату палива для доріг України, оскільки ці дороги не входять в базу даних, яка використовується у програмі VISSIM.

#### Висновки та перспективи подальших досліджень.

В роботі виконано аналіз моделей для підрахунку витрати палива та викидів від автомобіль-

них ТЗ. Проаналізовано можливість використання моделі CMEM для моделювання витрати дизельного біопалива. Показана залежність викидів оксидів азоту ТЗ від витрати палива. Проаналізовано використання транспортних технологій (програма VISSIM) для покращення моделювання витрати палива. Використання нової версії VISSIM разом з базами даних українських доріг дасть можливість

покращити точність прогнозування як витрати палива, так і викидів. На жаль, не вдалося виконати експериментальні дослідження з використанням суміші біодизеля і відновлювального палива як альтернативного палива з застосуванням методу нейронних мереж для моделювання витрати палива сумісно з Coventry University, UK. Але це може бути темою досліджень у майбутньому.

#### Список літератури:

1. Zhou M., Jin H., & Wang W. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport And Environment*. 2016. № 49. P. 203-218.
2. Колодницька Р.В. Процеси випаровування та згоряння дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2018. 192 с.
3. Barth M., An F., Younglove T., Scora G., Levine C., Ross M., and Wenzel T. The Development of a Comprehensive Modal Emissions Model. Final report to the National Cooperative Highway Research Program, April 2000. 435 p. URL: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_w122.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w122.pdf) (дата звернення: 12.12.2021).
4. Stevanovic A., Stevanovic J., Zhang, K., et al., Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions. *Transp. Res. Rec.* 2009. № 2128. P. 105–113.
5. Kanarachos S., Mathew J., Fitzpatrick M.E. Instantaneous vehicle fuel consumption estimation using smartphones and recurrent neural networks. *Expert Systems with Applications*. 2019. № 120. P. 436–447.
6. Al Qubeissi M., Sazhin S. S., Al-Esawi N., Kolodnytska R., Khanal B., Ghaleeh M. and Elwardany A. Heating and Evaporation of Droplets of Multicomponent and Blended Fuels: A Review of Recent Modeling Approaches. *Energy & Fuels*. 2021. № 35 (22). P. 18220-18256.
7. Kolodnytska R., Kravchenko O., Gerlici J. & Kravchenko K. The Effects of Biodiesel on NOx Emissions for Automotive Transport. *Communications -Scientific Letters of the University of Zilina*. 2022. № 24(1). С. B59-B66. 114-117.
8. Колодницька Р.В. Розпилювання дизельного палива та біопалива у двигунах внутрішнього згоряння: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2017. 210 с.
9. Колодницька Р.В. Моделювання затримки займання дизельного біопалива. *Технічна інженерія*. 2020. № 2 (86). С. 13–17.
10. Колодницька Р.В. Моделювання витрати дизельного біопалива для автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (Вінниця, 25 – 27 жовтня 2021 р.)*. Вінниця. 2021. С.
11. Scora G. and Barth M. Comprehensive modal emissions model (CMEM), version 3.01, user's guide. Univ. California, Riverside, CA, USA, Tech. Rep., 2006. URL:[https://www.cert.ucr.edu/sites/g/files/rcwecm1251/files/2019-07/CMEM\\_User\\_Guide\\_v3.01d.pdf](https://www.cert.ucr.edu/sites/g/files/rcwecm1251/files/2019-07/CMEM_User_Guide_v3.01d.pdf) (дата звернення: 15.01.2022).
12. Shang R., Zhang Y, Shen Z-J. M., Zhang Y. Analyzing the Effects of Road Type and Rainy Weather on Fuel Consumption and Emissions: A Mesoscopic Model Based on Big Traffic Data. *IEEE Access*. VOLUME 9, 2021. P. 62298-62315.

#### **Kolodnytska R.V. MODELING OF FUEL CONSUMPTION FOR ROAD TRANSPORT, TAKING INTO ACCOUNT TRANSPORT TECHNOLOGIES**

*Reducing fuel consumption and harmful emissions from road transport is one of the key problems of our day. Another problem that needs to be resolved immediately is the reduction of dependence on russian oil. One of the most dangerous fuels, the use of which is limited in Europe, is diesel fuel, which is carcinogenic and has high emissions of soot and nitrogen oxides. For cars that using an alternative fuel, models are needed that make it possible to calculate fuel consumption, as well as harmful emissions. In Europe, the most popular fuel for replacing diesel fuel is biodiesel (biodiesel fuel, diesel biofuel). The most promising model for calculating fuel consumption and emissions from automotive vehicles is SMEM (Comprehensive Modal Emissions Model), developed in the United States, is considered to be the most promising model for calculating fuel consumption. The CMEM model consists of six main modules that use the following input data: engine power, engine speed, air/fuel ratio, fuel use and catalyst characteristics.*

*This paper analyzed fuel consumption and harmful emissions calculated in the CMEM program for different types of cars in different categories using different cycles. Nitrogen oxide emission values have been shown to be grouped similarly for the same cycles depending on fuel consumption for passenger cars with TWC (three-*

way catalytic converters). *NOx emissions for the cycles show a linear dependence on fuel consumption for only one category of car: Tier 1, distance more than 50K miles, low power or weight. The possibility of using CMEM model for modeling the consumption of diesel biofuels is analyzed.*

*One of the advantages of SMEM program is the ability to interact with transport models and a database for transportation. The use of the new version of VISSIM (2022 y.) together with the databases of Ukrainian roads will make it possible to improve the accuracy of forecasting both fuel consumption and emissions. The topic of further research may be experiments using a mixture of biodiesel fuel and renewable fuel with the using of the neural network method to simulate fuel consumption for automotive transport.*

**Key words:** *SMEM, fuel consumption, transport technologies, diesel biofuels, harmful emissions, nitrogen oxides, VISSIM.*