

УДК 629.341:629.017

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.220257

## **Встановлення закономірностей взаємозв'язку між температурою навколишнього середовища та витратою палива міськими автобусами з дизелем**

**Д. О. Савостін-Косяк, М. Мондзель, А. Яворські, О. М. Іванушко,  
М. П. Цюман, А. В. Лобода**

*Автомобільний транспорт є основним споживачем енергетичних ресурсів в переважній більшості світових країн. Атмосферні умови, наряду з конструкцією автомобіля, його технічним станом, майстерністю водія, дорожніми та транспортними умовами суттєво впливають на витрату палива. Проте, при математичному моделюванні часто вони враховуються за усередненими значеннями, що може впливати на точність результатів.*

*Встановлено характер взаємозв'язків між температурою навколишнього середовища та витратою палива міськими автобусами з дизелем на основі експериментальних та аналітичних досліджень. За результатами аналізу експериментальних даних було встановлено, що цей взаємозв'язок описується поліноміальними регресіями другого порядку. Точність регресійної моделі було підтверджено критерієм Фішера для двох міських маршрутів.*

*Аналітичні дослідження впливу густини повітря, опору коченню, коефіцієнту корисної дії трансмісії і всіх цих трьох чинників разом на витрату палива проводились за допомогою математичного моделювання з використанням методології Physical Emission Rate Estimator. Було встановлено, що найбільший вплив на витрату палива мають опір коченню та коефіцієнт корисної дії трансмісії. В обох випадках різниця між найбільшим та найменшим розрахунковим значенням склала 2,5 %. Проте, в абсолютних одиницях виміру різниця більша на 0,2 л/100 км для опору коченню.*

*Отримані результати можуть бути використані в математичних моделях руху транспортних засобів, зокрема міських автобусів, для врахування динаміки зміни витрати палива в залежності від температури навколишнього середовища. Також вони будуть корисні в математичних моделях визначення шкідливих викидів для розрахунку витрати палива при різних температурах навколишнього середовища.*

*Ключові слова: витрата палива, температура навколишнього середовища, міські автобуси з дизелем, експериментальні дані.*

### **1. Вступ**

Автомобільний транспорт є одним з найбільш поширених видів пасажирського транспорту. Так, наприклад, в Європейському союзі (ЄС) 92,3 % наземних пасажирських перевезень здійснюється автомобільним транспортом. З них 9,4 % міжміськими і міськими автобусами та тролейбусами [1]. В країнах з менш потужною економікою дані показники набагато нижчі. Близько 50 % всіх пасажирських перевезень може здійснюватися автомобільним транспортом [2].

Незважаючи на таку різницю, транспортна галузь є найбільшим споживачем енергетичних ресурсів в обох випадках. Аналіз споживання енергії в країнах з розвинутою економікою показав, що транспортна галузь (30,8 %) є переважаючою [3]. Зокрема, автомобільний транспорт був домінуючим видом транспорту та споживав 93,4 % всіх енергетичних ресурсів [4]. В країнах з менш розвинутою економікою більш ніж 75 % нафтопродуктів споживається транспортною галуззю, зокрема 97 % – рухомих складом автомобільного транспорту [2]. Як видно зі статистики, питання раціонального використання енергетичних ресурсів, зокрема на автомобільному транспорті, є вкрай важливою проблемою. Встановлення взаємозв'язку між витратою палива та температурою оточуючого середовища дозволить більш раціонально підходити до вибору рухомого складу для здійснення міських пасажирських перевезень. Такі дослідження дозволять створити підґрунтя для аналізу економічної доцільності заміни рухомого складу автобусних парків на електробуси. В той же час, оцінка впливу окремих складових на витрату палива при різних температурах навколишнього середовища допоможе вибрати підприємствам основний фокус при обранні стратегії зниження експлуатаційної витрати палива в зимовий період.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Витрата палива залежить від багатьох факторів, серед яких досконалість конструкції транспортного засобу, технічний стан його агрегатів та систем, майстерність водія, умови експлуатації тощо. В свою чергу, умови експлуатації розділяють на умови зберігання, дорожні, транспортні та атмосферно-кліматичні умови [5, 6]. Атмосферно-кліматичні умови характеризуються поєднанням таких основних параметрів як температура навколишнього середовища, атмосферний тиск, вологість повітря, швидкість та напрям вітру. Також до них відносять рівень сонячної радіації, хмарність, атмосферні опади та наявність інших атмосферних явищ (ожеледь, туман, гроза тощо) [7].

Атмосферно-кліматичні умови враховуються у багатьох нормативних документах та математичних моделях, пов'язаних із визначенням витрати палива. Наприклад, математична модель «Physical Emission Rate Estimator» (PERE) [8] включає в якості вихідних даних щільність повітря, яка залежить від температури навколишнього середовища. Дана модель використовується Агенцією з охорони навколишнього середовища США (EPA) для розрахунку витрати палива в програмному забезпеченні «Motor Vehicle Emissions Simulator» (MOVES) [9]. У документі [10] враховується відсоток збільшення норми витрати палива залежно від фактичної температури навколишнього середовища. Також передбачено відсоток збільшення норми витрати палива на підтримання комфортних температурних умов у салоні автобуса. Крім того, густину палива, яка безпосередньо залежить від температури навколишнього середовища, можна знайти в багатьох різних рівняннях витрати палива [11].

Автомобільним транспортним засобом (АТЗ) паливо, в основному, витрачається на подолання термодинамічних та механічних втрат двигуна, опорів у трансмісії, дорожнього опору, зокрема, опору кочення та аеродинамічного опору [12]. На рис. 1 наведено розподіл втрат енергії на приведення автомобіля в рух [13].

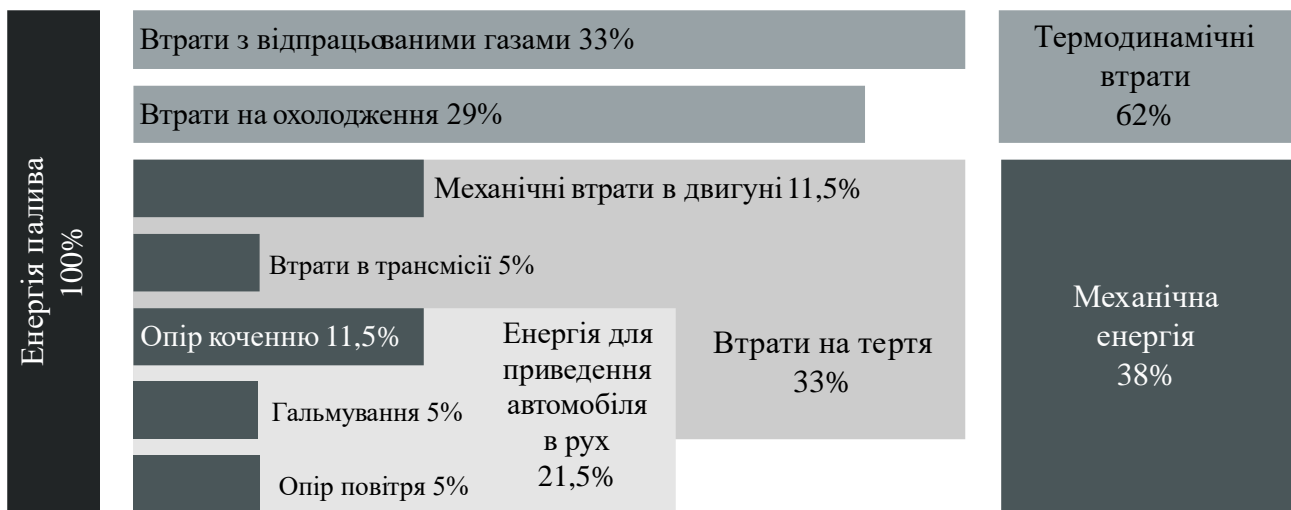


Рис. 1. Втрати енергії в двигуні внутрішнього згорання

На процес горіння суттєво впливають неоптимальні теплові умови двигуна. Зниження температури навколишнього середовища призводить до утрудненого запуску дизельного двигуна через збільшення кінематичної в'язкості та густини дизельного палива [14]. Такі показники дизельного палива як в'язкість, густина та поверхневий натяг впливають на тонкість розпилювання, повноту згорання та витрату палива. Чим менше значення цих показників, тим краще розпилювання, тим меншого діаметру краплини утворюються при розпилюванні палива, тим краще випаровування. Але при цьому зменшується далекобійність струменя, тому що маленькі краплинки мають малий запас кінетичної енергії. Спостерігається нерівномірність утворення горючої суміші, неповнота згорання і перевитрати палива за рахунок недовикористання кисню [15]. Із зниженням в'язкості погіршуються мастильні властивості дизельного палива. З підвищенням в'язкості дизельного палива збільшується глибина проникнення струменя, тому що утворюються краплі великого діаметру, поліпшується однорідність горючої суміші. Але при цьому погіршується випаровуваність і повнота згорання палива. Це провокує його перевитрату, втрату потужності, підвищення димності і токсичності відпрацьованих газів [16]. При низьких температурах двигун переохолоджується [17]. Як наслідок, моторна оливи загущується, підвищується момент опору прокручування колінчастого валу, що веде до збільшення витрати палива [18]. Крім того, низька температура навколишнього середовища призводить до зниження температури робочого тіла в кінці такту стиснення в циліндрі двигуна, і період затримки самозаймання палива зростає. Це супроводжується підвищеною швидкістю наростання тиску і неповним згоранням [19].

Результати дослідження [20] показали, що холодна погода збільшує теплові втрати у вихлопному колекторі та металевих трубопроводах і призводить до більших теплових втрат вихлопних газів. Як наслідок, 10,5 % палива втрачається через термічні втрати та теплопередачу металом вихлопній системи.

Збільшення опору в трансмісії при низьких температурах відбувається через збільшення в'язкості трансмісійної рідини. В'язкості є вкрай важливим показником для гідродинамічних силових передач через значний вплив на тертя у

проточному каналі. Нижча в'язкість означає нижчі втрати швидкості кругового масового потоку в проточному каналі гідродинамічної трансмісії [21]. Згідно з результатами дослідження [22], коефіцієнт корисної дії (ККД) трансмісії має лінійну залежність від температури трансмісійної оливи в режимах холостого ходу та повного навантаження. У режимах часткового навантаження, ККД трансмісії коливається в межах 1 % в діапазоні температур від  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . У більш високому діапазоні температур він також починає зростати лінійно.

Одним з основних факторів збільшення витрати палива при низькій температурі навколишнього середовища є підвищення опору коченню шин. Відповідно до [23], характеристики опору коченню в залежності від температури навколишнього середовища для шин легкових автомобілів майже лінійні, тоді як характеристики шин вантажних автомобілів набагато краще описуються лінійною регресією другого порядку.

Аеродинамічний опір – це сила опору, яка діє з боку повітря на рухомий предмет. Сила опору залежить від щільності повітря, швидкості автомобіля, безрозмірного коефіцієнта опору транспортного засобу та фронтальної площі транспортного засобу [24]. Серед усіх цих змінних щільність повітря є найбільш значущою. Холодне повітря щільніше теплого, тому сила опору вище взимку. При  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  сила опору приблизно на 12 % більша, ніж при  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [25].

Випробування паливної економічності показали, що у міському режимі їзди пробіг у автомобілів з бензиновим двигуном приблизно на 15 % менший при  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ніж при  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ці значення збільшуються до 24 % при поїздках на дуже короткі (5–6 км) дистанції [26]. Низька температура навколишнього середовища також призводить до збільшення шкідливих викидів транспортними засобами [27, 28]. Це особливо актуально для режимів холодного пуску двигуна, коли температури моторної оливи, охолоджуючої рідини та блоку циліндрів рівні або близькі до температури навколишнього середовища [29–32].

Визначення впливу температури навколишнього середовища на витрату палива потребує великої кількості статистичних даних, що суттєву ускладнює дослідження, тому досить важливим, з точки зору наукового пошуку, є виявлення закономірностей зміни цих параметрами. У роботі [33] наведено результати дослідження впливу температури навколишнього середовища та атмосферного тиску на витрату палива бензинового двигуна шляхом математичного моделювання. Дослідження проводились для широкого спектру температур, вологості повітря та атмосферного тиску. Проте, воно сконцентроване на витраті палива саме двигуна, а не транспортного засобу в цілому, тому не враховує ряд параметрів, які характерні для умов експлуатації. В роботі [34] наведена методика, яка дозволяє корегувати норми витрати палива комерційних автомобілів в залежності від температури навколишнього середовища. В той же час, режими експлуатації міських автобусів та комерційних автомобілів суттєво відрізняються, що залишає місце для досліджень в даному напрямі. В роботі [35] наведені результати експериментальних досліджень впливу температури навколишнього середовища на витрату палива спеціалізованого рухомого складу. Особливістю експлуатації даного виду рухомого складу є те, що частина палива витрачається на привод спеціалізованого обладнання, що не є характерним для більшості транспортних засобів. В роботі [36] на-

ведений порівняльний аналіз витрати палива вантажними автомобілями, які працюють за дизельним та газодизельним циклами в залежності від температури навколишнього середовища та рівня завантаженості. І хоча дизельні двигуни, які встановлюються на вантажні автомобілі та автобуси, схожі за своєю конструкцією, суттєво відрізняються умови експлуатації, тому результати даних досліджень потребують уточнення для міських пасажирських перевезень. Крім цього, залишається відкритим питання, які саме складові експлуатаційної витрати палива визначають найбільший її приріст за різних температур навколишнього середовища. Вищезазначене дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень, присвячених встановленню характеру взаємозв'язків між витратою палива та температурою навколишнього середовища для умов міських пасажирських перевезень. Також в даних дослідження варто оцінити вплив окремих складових на сумарну витрату палива.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є визначення закономірностей впливу температури навколишнього середовища на витрату палива міськими автобусами з дизелем. Це дасть можливість врахувати отримані залежності в математичних моделях руху транспортних засобів та визначення шкідливих викидів при розрахунках витрати палива для різних значень температур навколишнього середовища.

Поставлена мета передбачає вирішення наступних задач:

- провести експериментальні дослідження по визначенню температури навколишнього середовища та експлуатаційної витрати палива для автобусів, що експлуатуються на двох міських маршрутах;
- побудувати регресійну математичну модель впливу температури навколишнього середовища на витрату палива міськими автобусами з дизелем;

### **4. Матеріали та методи дослідження впливу температури навколишнього середовища на витрату палива**

#### **4.1. Експериментальні дослідження**

Збір експериментальних даних про витрату палива проводився на декількох міських маршрутах для автобусів комунального підприємства у м. Києві. Дослідження проводилось з 1.01.2017 по 30.06.2018.

З метою зменшення впливу технічного стану автобусів на отримані результати, як об'єкт дослідження було обрано 26 автобусів 2017 та 2018 років випуску. Коротку технічну характеристику автобусів, що досліджувались наведено в табл. 1.

Для вибору маршрутів для дослідження було проаналізовано кількість рейсів за рік на кожному з них (рис. 2).

Як видно з рис. 2, найбільша кількість рейсів за рік припадає на маршрути А, В, С і D. Проте, на момент проведення дослідження маршрут В було лише започатковано і пасажиропотік був дуже малий. А отже дані, отримані в результаті дослідження не відображали б реальної картини, коли маршрут вийшов би на усталений режим роботи. Маршрут С з'єднує центр міста з промисловою околицею міста і тому теж не користується попитом, а виконує соціаль-

ну функцію об'єднання районів міста. Таким чином, для дослідження було обрано маршрут А (рис. 3) і D (рис. 4), оскільки вони давно працюють і мають усталений пасажиропотік, на них здійснюється найбільша кількість рейсів за рік і тому є достатня кількість статистичних даних для забезпечення точності результатів дослідження.

Таблиця 1

Коротка технічна характеристика автобусів, що досліджувались

Параметр	Значення
Габаритні розміри, мм	
довжина	11980
ширина	2550
висота	2774
Колеса, (розмір шин)	275/70 R22,5
Повна маса, кг	18000
Двигун	Daimler OM 906 hLa EURO 5
об'єм, л	6,37
потужність, кВт (л.с.)/хв <sup>-1</sup>	210 (285)/2200
максимальний крутний момент, Нм/хв <sup>-1</sup>	1120/1200-1600
Трансмісія	ZF 6HP-504C

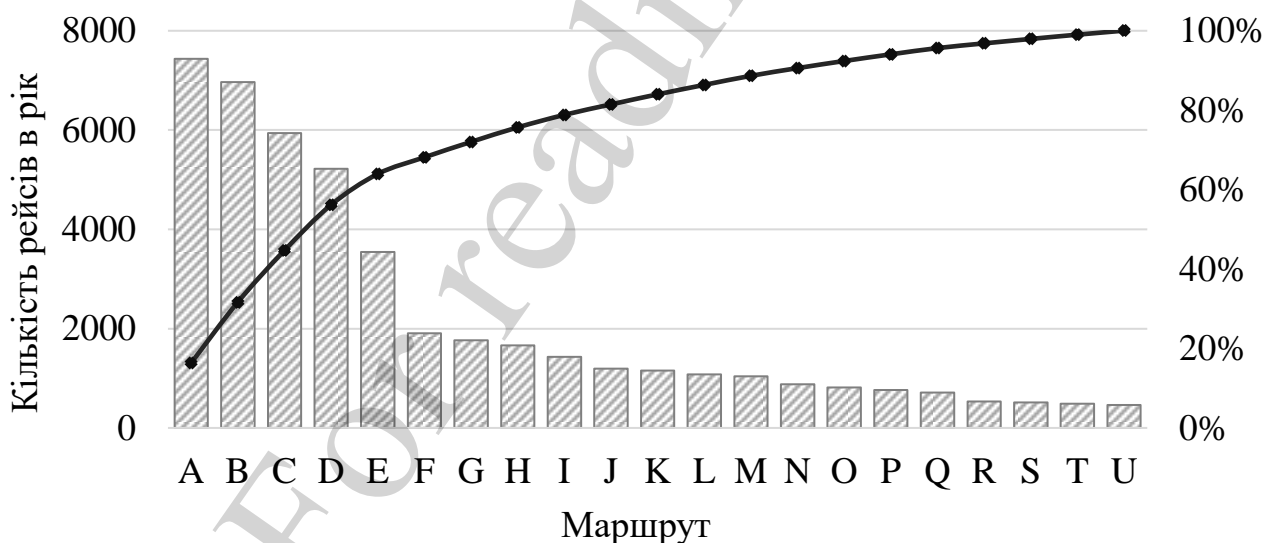


Рис. 2. Кількість рейсів на рік по маршрутах

Параметри маршрутів записувались за допомогою GPS датчика GlobalSat ND-105C. Приклад карти швидкостей графіку динаміки зміни поздовжнього ухилу дороги наведено на рис. 5, 6. Основні характеристики маршрутів наведені в табл. 2.

Температура навколишнього середовища вимірювалася цифровим термометром ТРМ 10 з виносним датчиком, який має діапазон вимірювання від  $-50$  до  $80$  °C та похибку вимірювання  $\pm 1$  °C.

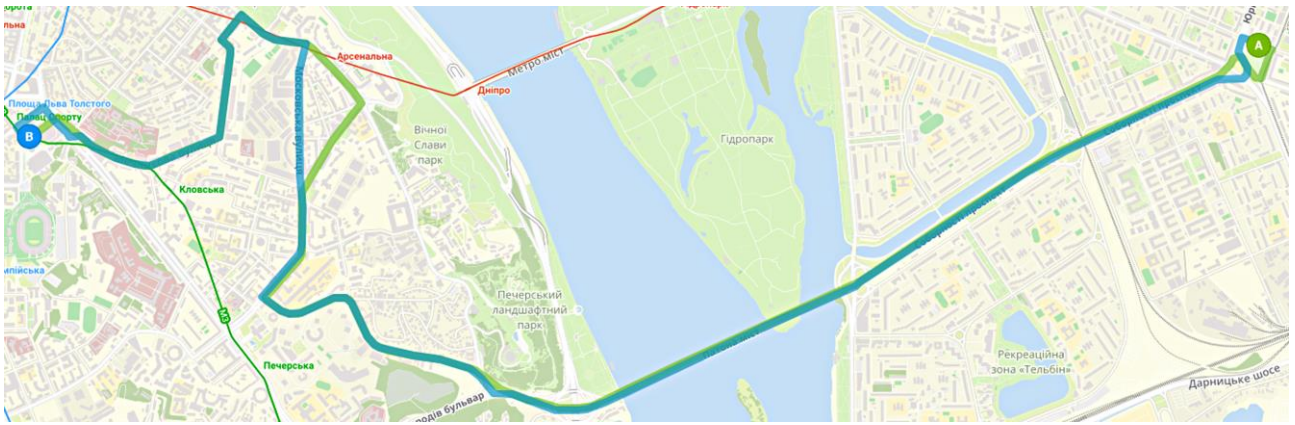


Рис. 3. Схеми маршруту А



Рис. 4. Схеми маршруту D

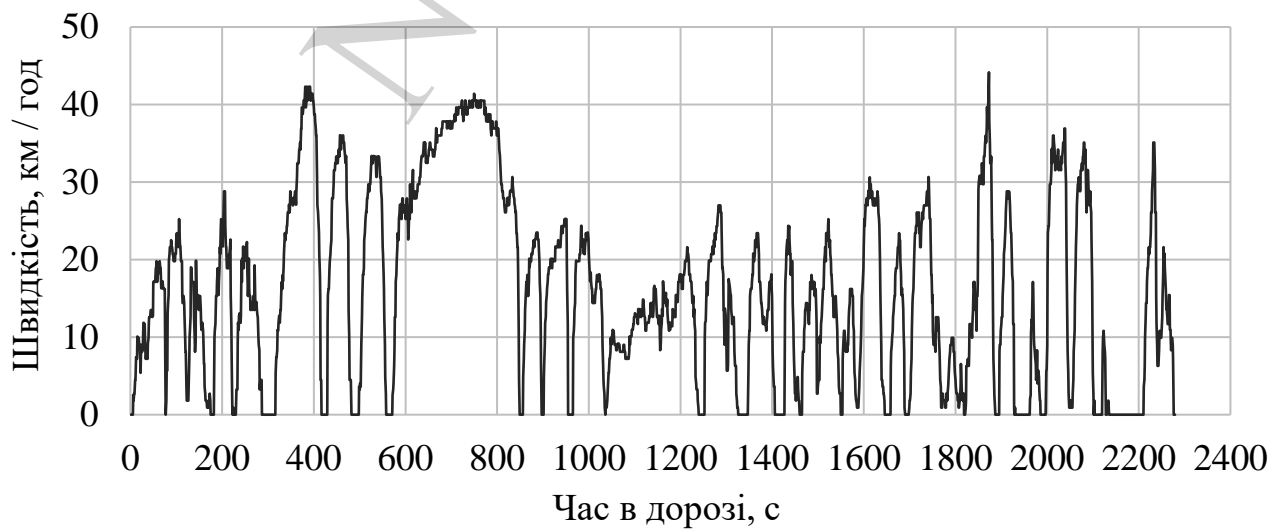


Рис. 5. Карта швидкостей. Маршрут А. Поїздка з пункту А в пункт В

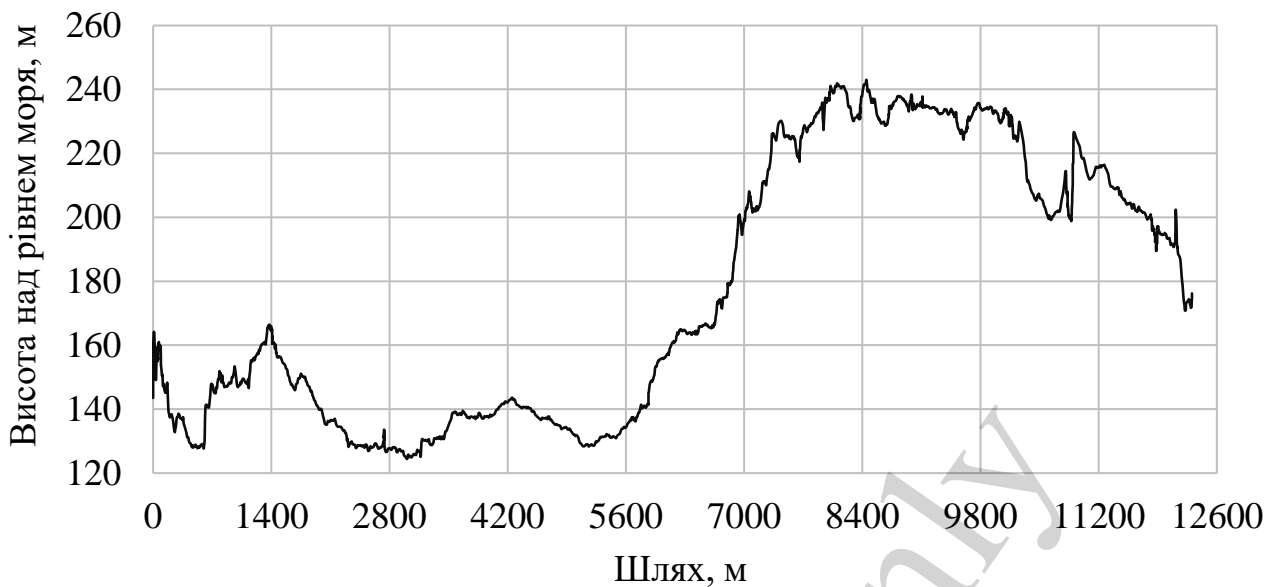


Рис. 6. Графік динаміки зміни поздовжнього ухилу дороги. Маршрут А. Поїздка з пункту А в пункт В

Таблиця 2

Коротка характеристика маршрутів

Параметр	Значення	
	Маршрут А	Маршрут D
Довжина, м		
А–В	12300	8410
В–А	12220	8000
Середня швидкість, км/год	18,6	14,4
Максимальний поздовжній ухил, %	13,2	9,2

Всі піддослідні автобуси були обладнані супутниковими системами контролю витрати палива, тому дані про кількість спожитого палива було отримано з облікової бази даних підприємства. Також було проведено контрольні вимірювання витрати палива методом «наповнення до повного баку». Цей метод був обраний, оскільки, згідно з інструкціями підприємства, наприкінці зміни автобус повинен бути заправлений до повного бака.

Контрольні вимірювання проводили в такій послідовності:

1) на початку зміни вмикався запис GPS даних, і автобус виїжджав на маршрут;

2) після повернення до парку в кінці зміни автобус заправлявся до повного бака. Кількість палива реєструвалась за допомогою автоматичної модульної заправної станції (рис. 7). У цьому випадку кількість витраченого палива за зміну дорівнює кількості палива, заповненого до повного бака після повернення в парк.

3) витрата палива розраховувався як співвідношення витраченого пального до загального пробігу за зміну і множилась на 100 для того, щоб перевести значення в л/100 км.





Рис. 7. Автоматична модульна заправна станція

Контрольні вимірювання проводили протягом 8 днів – три вимірювання у будні та одне у вихідні для кожного з маршрутів. Контрольні виміри підтвердили точність облікових даних. Сумарне відхилення виміряних величин у порівнянні з даними, отриманими з інформаційної бази, не перевищувало 3 %.

Мінімально достатній об'єм вибірки для досягнення заданої точності при статистичних дослідженнях можна визначити за формулою:

$$n = \frac{T^2 \cdot \sigma^2 \cdot N}{\Delta^2 \cdot N + T^2 \cdot \sigma^2}, \quad (1)$$

де  $T^2$  – критичне значення критерію Стюдента при відповідному рівні значущості. Для рівня значущості 0,05  $T^2=1,96$ ;

$\sigma$  – стандартне відхилення вимірюваної величини;

$\Delta$  – гранично допустима похибка;

$N$  – об'єм генеральної сукупності.

#### 4. 2 Аналітичні дослідження

Основною метою аналітичних досліджень було визначити вплив щільності повітря, опору коченню, ККД трансмісії та всіх трьох факторів разом на витрату палива шляхом математичного моделювання. Для розрахунків було використано математичну модель PERE [8]. За вихідні дані було прийнято посекундні карти швидкостей, графіки динаміки зміни поздовжнього ухилу догори (рис. 4, 5) та технічно характеристики автобуса (табл. 1). Залежності між щільністю повітря, опором коченню, ККД трансмісії та температурою навколишнього середовища була взята з джерел [22, 23, 25] відповідно.

Першим кроком було калібрування математичної моделі. День з відомими значеннями температури навколишнього середовища та витрати палива було випадковим чином обраний із обсягу експериментальних даних. Потім, постійні вхідні дані та змінні значення відповідної температури навколишнього середовища було підставлено в математичну модель. Щоб отримати відповідність між розрахунковими та експериментальними значеннями витрати палива, вагу ав-

тобуса було зменшено з 18000 кг до 14200 кг, що відповідає середньому навантаженню за зміну.

Після калібрування значення щільності повітря, опору коченню та ККД трансмісії в залежності від температури навколишнього середовища в діапазоні від  $-14$  до  $+26$  °C підставлялися в математичну модель по одному, а потім усі разом.

## 5. Результати досліджень щодо встановлення взаємозв'язку між температурою навколишнього середовища та витратою палива

### 5. 1. Результати експериментальних досліджень

Протягом року зміни температури навколишнього середовища мають циклічний та синусоїдальний (рис. 8). Добові коливання не перевищують  $10$  °C. Таким чином, сезонні зміни витрати палива, спричинені коливаннями температури, також повинні бути циклічними, що означає, що їх можна передбачити. Можливість передбачати такі зміни є важливим аспектом фінансового планування для комунального підприємства.

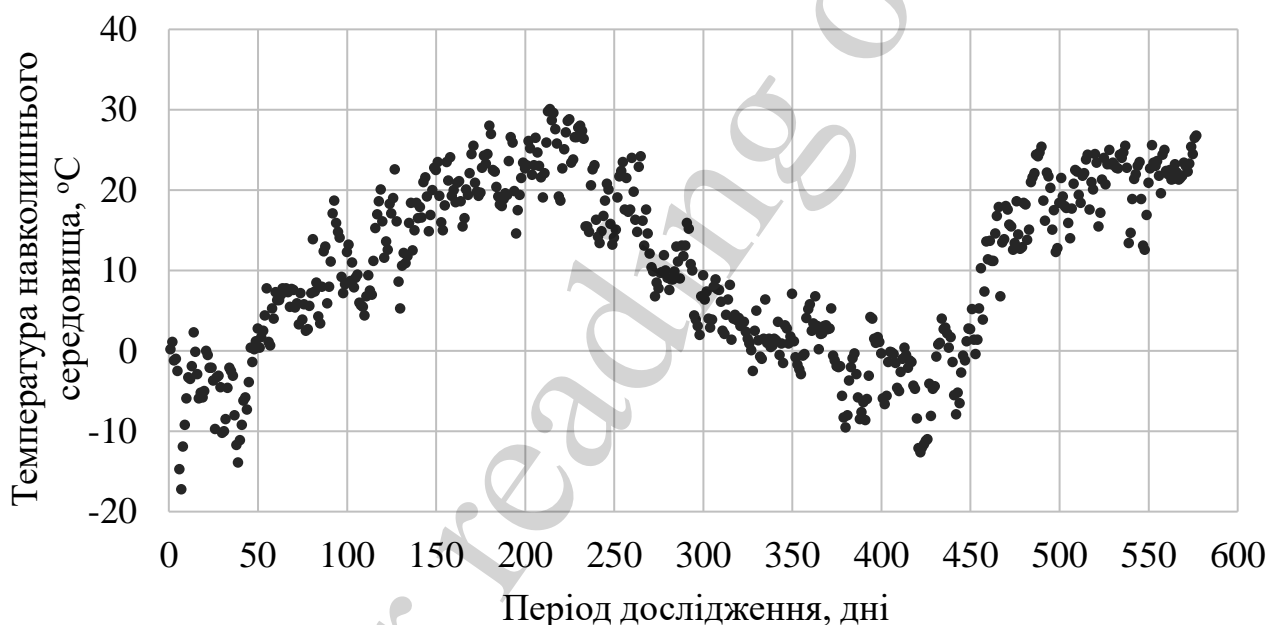


Рис. 8. Графік зміни температури навколишнього середовища з 01.01.2017 по 30.06.2018

За дослідний період з облікової бази підприємства було отримано 549 значення витрати палива для маршруту А та 252 значення для маршруту D для діапазону температур від  $-13$  °C до  $+26$  °C.

Результати розрахунків мінімально достатніх об'ємів вибірки за формулою (1) для отриманих значень витрати палива наведені в табл. 3.

На першому етапі було визначено середні значення та середньоквадратичні відхилення витрати палива, щоб оцінити їх розкид для кожного значення температури. Це дало змогу перевірити наявність даних, що значно відрізнялися від середніх показників і могли вказати на фактори, які впливали б на точність кінцевих результатів (рис. 9, 10).

Таблиця 3

Результати визначення мінімально достатніх об'ємів вибірки для досягнення заданої точності при статистичних дослідженнях

Маршрут	Довірча ймовірність	Гранично допустима похибка	Стандартне відхилення	Об'єм генеральної сукупності	Об'єм вибірки
A	95 %	5 %	0,681	549	310
D	95 %	5 %	0,725	252	192

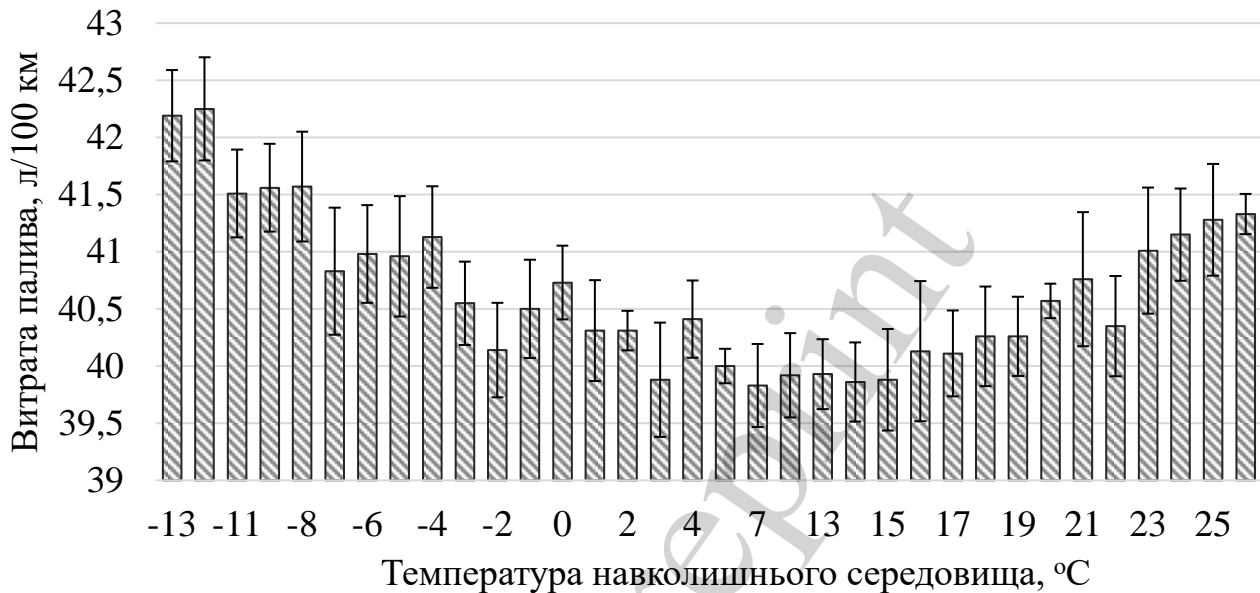


Рис. 9. Середні значення та середньоквадратичні відхилення витрати палива. Маршрут А

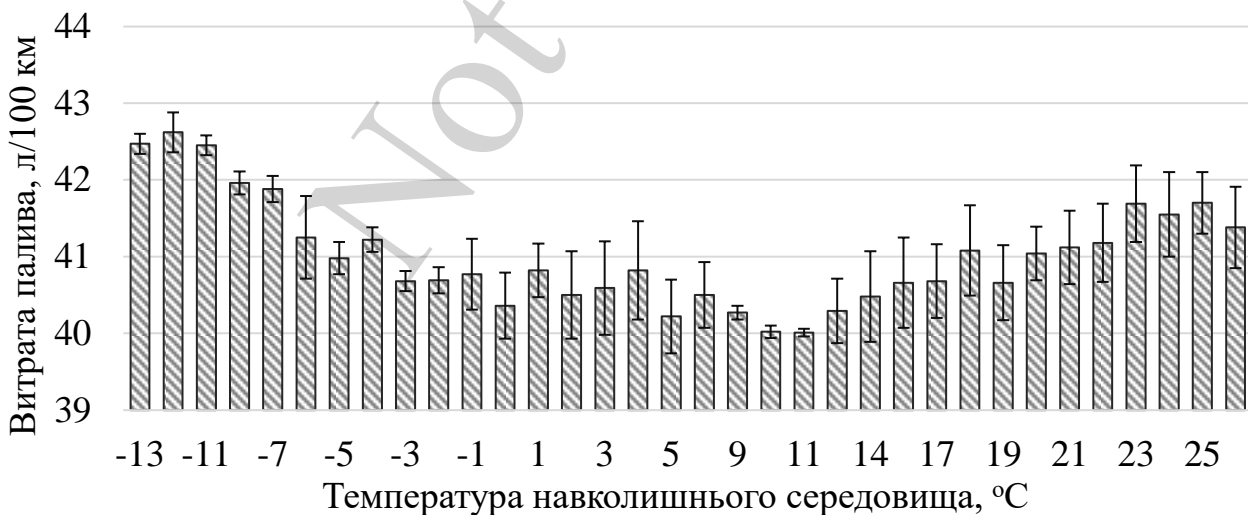


Рис. 10. Середні значення та середньоквадратичні відхилення витрати палива. Маршрут D

Як видно з графіків (рис. 9, 10), надзвичайно високих значень середньоквадратичного відхилення для розглянутих маршрутів не було виявлено. Для

маршруту А воно знаходиться в межах 0,15–0,614, а для маршруту D в межах 0,05–0,64. Менші значення нижнього граничного значення для маршруту D можна пояснити тим, що для деяких значень температур було проведено лише 2 вимірювання витрати палива.

## 5. 2. Побудова регресійних моделей впливу температури навколишнього середовища на витрату палива

Наступним кроком було визначення регресійної моделі, яка описує зв'язок між витратою палива та температурою навколишнього середовища. Для цього, на основі отриманих даних, було побудовано графічні залежності (рис. 11, 12).

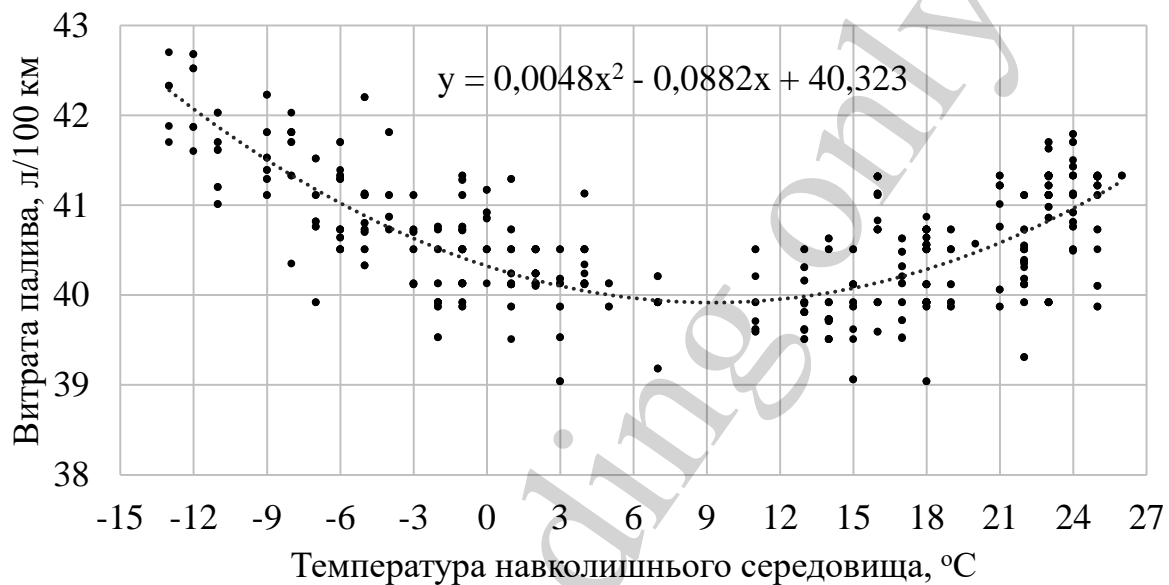


Рис. 11. Графічна залежність витрати палива від температури навколишнього середовища. Маршрут А

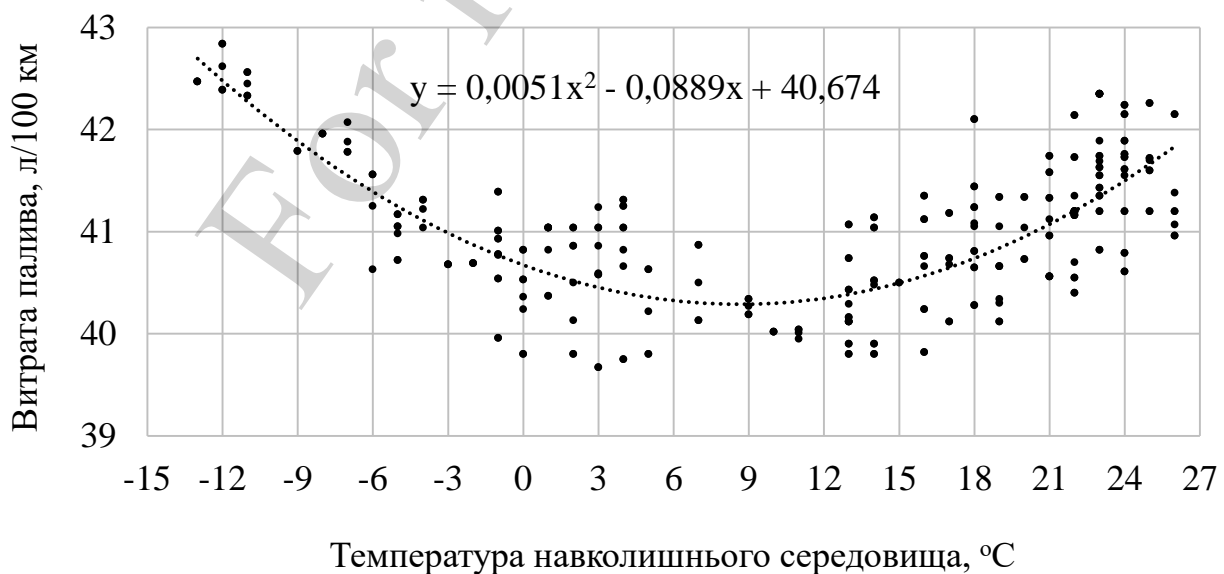


Рис. 12. Графічна залежність витрати палива від температури навколишнього середовища. Маршрут D

Поліноміальні залежності (табл. 4) витрати палива  $Q_s$  від температури навколишнього середовища  $t$  було отримано методом найменших квадратів. Точність апроксимації було перевірено коефіцієнтом Фішера. В загальному вигляді, дана залежність може бути описана рівнянням регресії другого порядку:

$$Q_s(t) = a \cdot t^2 + b \cdot t + c, \quad (2)$$

де  $a, b, c$  коефіцієнти полінома.

Як видно з табл. 4, залежності мають дуже близькі значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$ . В той же час, коефіцієнт  $c$  пропорційний витраті палива нового автобуса на певному маршруті ( $Q_{s0}$ ). Відношення  $c$  до  $Q_{s0}$  знаходиться в межах 1,15–1,45 %.

Таблиця 4

Вплив температури навколишнього середовища на витрату палива. Результати апроксимації експериментальних даних

Маршрут	Поліноміальна регресія	Фактична витрата палива в перший місяць експлуатації, л/100 км	$c/Q_{s0}$	Коефіцієнт Фішера ( $\alpha=0.05$ )
A	$Q_s(t) = 0,0048 \cdot t^2 - 0,0882 \cdot t + 40,32$	39,74	1,014 5	553,53 > 1,96 4
D	$Q_s(t) = 0,0051 \cdot t^2 - 0,0889 \cdot t + 40,673$	40,21	1,011 5	282,28 > 1,96 9

Результати, наведені в табл. 4, можна підсумувати рівнянням для визначення витрати палива при заданій температурі у загальному вигляді. Для цього було визначено середні арифметичні значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$ . Коефіцієнт  $c$  було представлено як добуток середніх арифметичних значень із стовпця 4 табл. 4 та  $Q_{s0}$ .

$$Q_s(t) = 0,005 \cdot t^2 - 0,0885 \cdot t + 1,013 \cdot Q_{s0}. \quad (3)$$

Для перевірки точності залежності (3) із експериментальних даних було випадковим чином обрано значення температур навколишнього середовища. Для цих значень було розраховано витрату палива за допомогою залежності (3). Далі розраховані значення витрати палива порівнювались з експериментальними. Підтвердження взаємозв'язку між експериментальними та розрахунковими значеннями здійснювалось за допомогою коефіцієнта Фішера. Відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищує 1,15 %. Результати розрахунків наведено в табл. 5.

Коефіцієнт Фішера вказує на високу точність запропонованої поліноміальної залежності (3).

Таблиця 5

Результати розрахунків витрати палива в залежності від температури навколишнього середовища в порівнянні з експериментальними даними

Температура оточуючого середовища, °С	Фактична витрата палива, л/100 км	Розрахункова витрата палива, л/100 км	Коефіцієнт Фішера ( $\alpha=0,05$ )
Маршрут А			
-13	42,19	42,25	253,24 > 2,201
-9	41,56	41,46	
-6	40,98	40,97	
-3	40,55	40,57	
0	40,73	40,26	
3	39,88	40,04	
7	39,83	39,88	
11	39,92	39,89	
14	39,86	40,00	
17	40,11	40,20	
20	40,57	40,49	
23	41,01	40,87	
26	41,33	41,34	
Маршрут D			
-13	42,47	42,73	94,69 > 2,201
-9	41,79	41,93	
-6	41,25	41,44	
-3	40,68	41,04	
0	40,36	40,73	
3	40,59	40,51	
7	40,50	40,36	
11	40,01	40,36	
14	40,48	40,47	
17	40,68	40,67	
20	41,04	40,96	
23	41,69	41,34	
26	41,38	41,81	

Результати аналітичних досліджень наведено на рис. 13 та у табл. 6. Точка перетину на рис. 13 відповідає даним, які використовувались для калібрування математичної моделі.

Згідно з результатами аналітичних досліджень, щільність повітря має найменший вплив на витрату палива серед трьох досліджуваних факторів (рис. 13). Різниця між мінімальним та максимальним значеннями витрати палива становила 0,12 %. Дана залежність описується рівнянням регресії другого порядку (табл. 6). Проте, оскільки коефіцієнт перед першим членом рівняння дуже малий ( $5,69 \cdot 10^{-6}$ ), дану залежність можна спростити до лінійної. В такому випадку

рівняння набуде вигляду  $Q_s(t) = -0,001253 \cdot t + 40,38$  ( $R^2=0,9626$ ). Найбільший вплив має опір коченню. Різниця між мінімальною та максимальною витратою палива становить 2,5 %. Цю залежність також можна описати рівнянням регресії другого порядку (табл. 5).

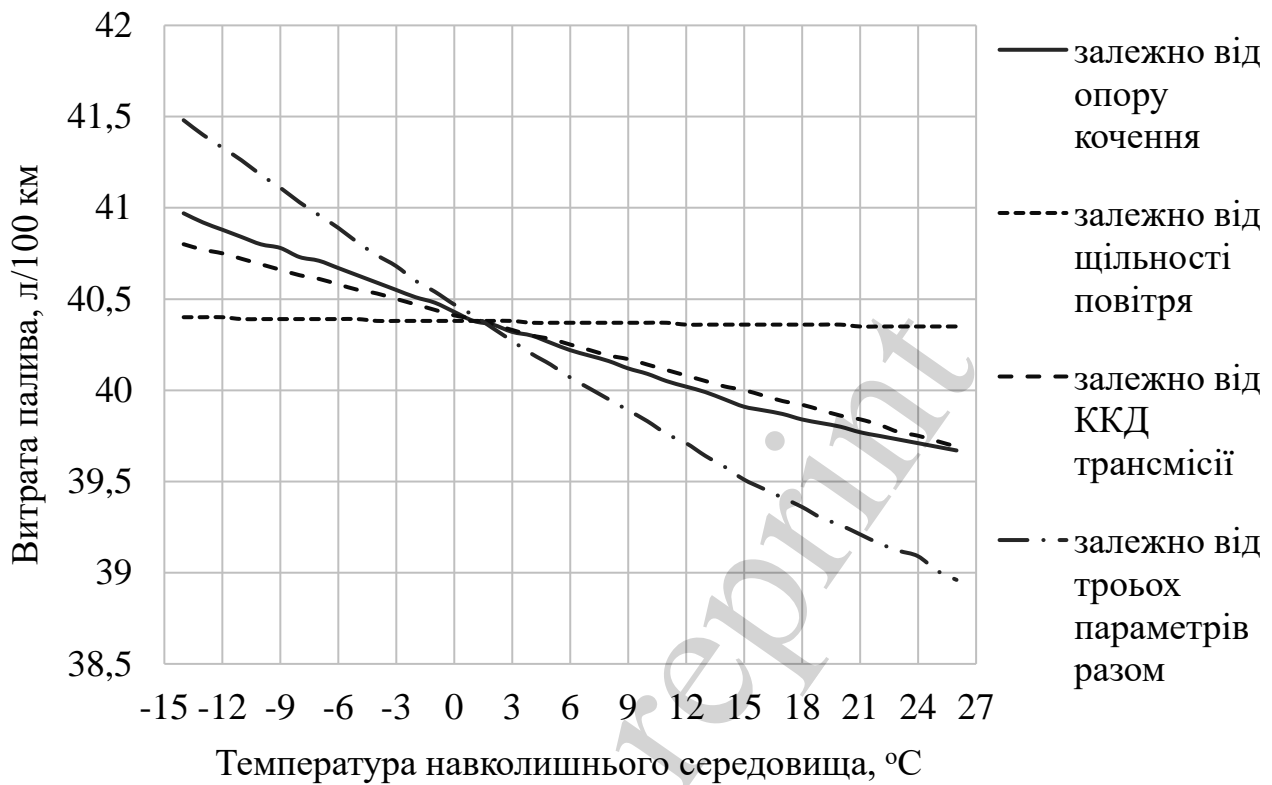


Рис. 13. Графік витрати палива в залежності від зміни опору кочення, щільності повітря та ККД трансмісії при різних температурах навколишнього середовища

Таблиця 6

Поліноміальні залежності витрати палива в залежності від зміни опору кочення, щільності повітря та ККД трансмісії при різних температурах навколишнього середовища

Найменування фактору	Залежність	$R^2$
Опір коченню	$Q_s(t) = 0,0002 \cdot t^2 - 0,0361 \cdot t + 40,427$	0,9990
Щільність повітря	$Q_s(t) = 5,69 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,001321 \cdot t + 40,38$	0,9648
ККД трансмісії	$Q_s(t) = -0,02768 \cdot t + 40,414$	0,9998
Три фактори разом	$Q_s(t) = 0,0004 \cdot t^2 - 0,0678 \cdot t + 40,465$	0,9998

Вищий ККД трансмісії в теплу погоду призводять до зменшення витрати палива на 2,5 %, як і у випадку з опором коченню. Але в абсолютних одиницях різниця дещо менша ( $\Delta Q_s(\eta)=1,1 < \Delta Q_s(C_r)=1,3$  л/100 км) і витрата палива змінюється лінійно. Одночасний вплив усіх трьох факторів можна описати рівнянням регресії другого порядку (табл. 6).

Результати розрахунку відповідають середнім значенням витрати палива, отриманим експериментально в інтервалі температур навколишнього середовища від  $-12$  до  $+10$  °С. При більших значеннях температур, експериментальні значення витрати палива збільшуються, в той час як розрахункові значення продовжують зменшуватись (рис. 14).

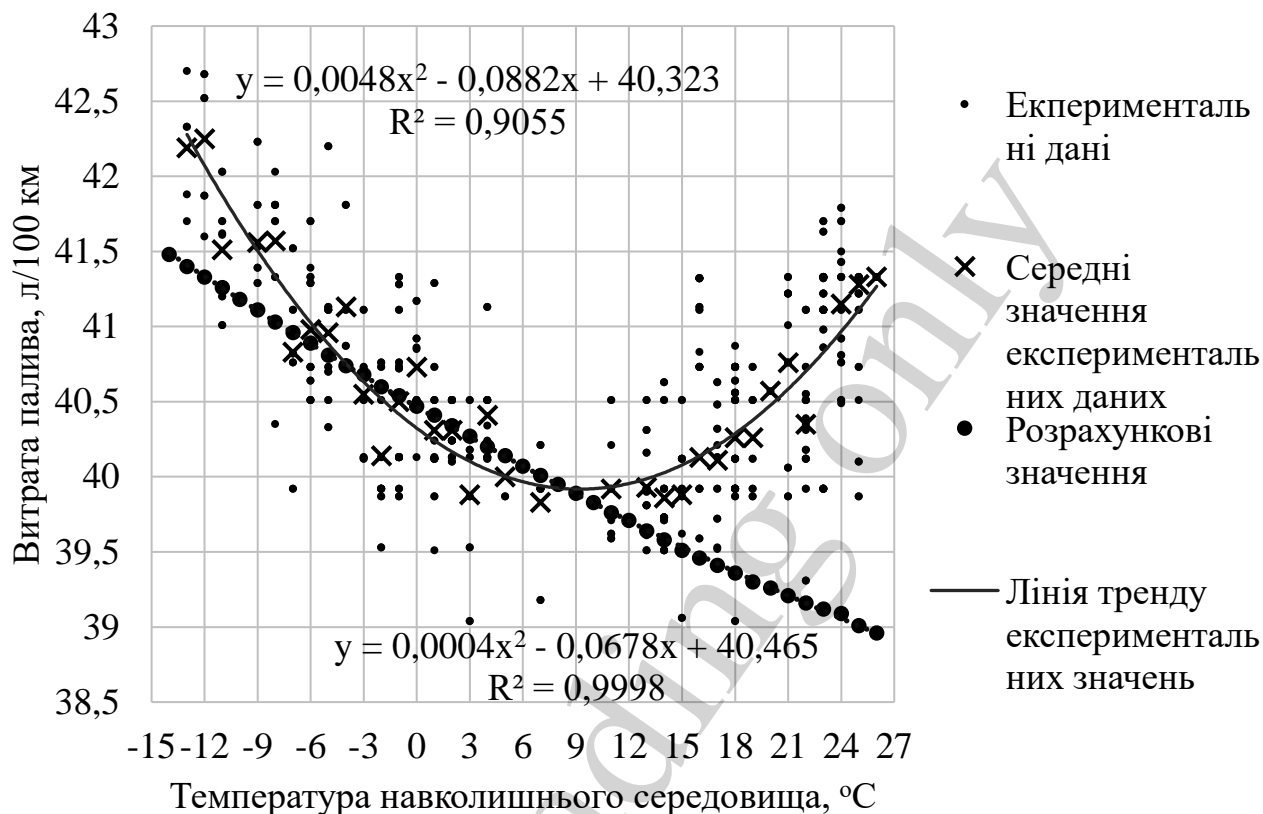


Рис. 14. Порівняння розрахункових та експериментальних зазначень витрати палива

Загальне відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями не перевищує 1 % в діапазоні температур від  $-8$  до  $+15$  °С. Вище  $+16$  °С відхилення починає значно зростати і досягає значення 5,9 % при температурі в  $+26$  °С. Цю ж тенденцію можна побачити при температурі нижче  $-9$  °С.

## 6. Обговорення результатів дослідження впливу температури навколишнього середовища на витрату палива

Результати дослідження дали змогу встановити характер залежності температури навколишнього середовища та витрати палива міських автобусів з дизелем. Ці залежності описуються поліноміальними рівняннями другого порядку (табл. 4), які були отримані за результатами обробки та аналізу експериментальних даних (рис. 11, 12).

Зважаючи на близькі значень коефіцієнтів полінома, під час апроксимації експериментальних даних (табл. 4) було запропоновано загальний вигляд рів-



няння (3) для визначення витрати палива за відомої температури навколишнього середовища.

Точність регресійних моделей була підтверджена коефіцієнтом Фішера для двох міських автобусних маршрутів ( $F(0,05)=253,24 > 2,039$  для маршруту А;  $F(0,05)=94,69 > 2,201$  для маршруту D). Відхилення розрахункових та експериментальних даних не перевищують 1,15 % (табл. 5).

Отримані результати аналогічні тим, що були отримані у попередніх дослідженнях [34–36]. У всіх розглянутих випадках взаємозв'язок між температурою навколишнього середовища та витратою палива описується поліноміальними рівняннями другого порядку. Отримані результати підтверджують попередні дослідження та доповнюють їх ще одним типом рухомого складу.

Також було проведено аналітичні дослідження для визначення впливу щільності повітря, опору коченню та коефіцієнту корисної дії трансмісії на витрату палива методом математичного моделювання (рис. 13). Згідно з розрахунками, опір коченню та коефіцієнт корисної дії трансмісії мають найбільший вплив на витрату палива серед цих трьох факторів. Різниця між максимальним та мінімальним розрахунковим значенням в обох випадках була 2,5 % (рис. 13).

Результати розрахунків з використанням трьох факторів відповідають середнім експериментальним значенням витрати палива в діапазоні температур навколишнього середовища від  $-12$  до  $+10$  °С. При більших значеннях температур, експериментальні значення витрати палива збільшуються, в той час як розрахункові продовжують знижуватись (рис. 14). Це можна пояснити тим, що, як зазначено в [15], підвищення температури навколишнього середовища призводить до зниження площі розпилення та далекобійності струменя внаслідок підвищеної випаровуваності палива, що впливає на ефективність згоряння палива. Крім того, збільшення витрати палива влітку може бути спричинена використанням кондиціонера. Ці фактори, так само як і зміна густини палива в залежності від температури навколишнього середовища, не враховувались під час математичного моделювання.

Сумарне відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями не перевищує 1 % в діапазоні температур від  $-7$  до  $+15$  °С. Для температур понад  $+16$  °С відхилення швидко починає зростати і досягає значення 5,9 % при  $+26$  °С (рис. 14).

Зростання сумарного відхилення в діапазоні температур нижче  $-9$  °С можна пояснити значним збільшенням в'язкості дизельного палива, що призводить до зменшення випаровуваності та погіршення повноти згоряння [16]. Крім того, більша в'язкість підвищує силу тертя палива об стінку сопла розпилювача форсунки [15], що впливає на швидкість подачі палива та повноту його згоряння.

Схожі залежності між витратою палива та температурою навколишнього середовища, отримані математичним моделюванням, були представлені в роботі [24].

Отримані результати можуть бути використані в складних математичних моделях руху транспортного засобу, зокрема для міських автобусів, та математичних моделях визначення шкідливих викидів при розрахунках витрати палива для різних значень температур навколишнього середовища.

Обмеження поточного дослідження пов'язані з використанням конкретної моделі автобусів, що працюють у певних умовах експлуатації. Проте, дане дослідження, на ряду з попередніми дослідженнями в цьому напрямі, підтверджують характер взаємозв'язку між витратою палива та температурою навколишнього середовища. Відтак, для визначення поліноміальних коефіцієнтів для інших марок та моделей міських автобусів потрібно проводити додаткові дослідження.

## 7. Висновки

1. За результатами експериментальних досліджень було встановлено, що динаміка зміни температури навколишнього середовища в помірній кліматичній зоні має синусоїдний характер лежить в межах від  $-15$  до  $+30$  °С. Такі кліматичні умови призводять до того, що в граничних значеннях температур витрата палива міськими автобусами з дизелем збільшується до 7 %. В той же час, мінімальні її значення спостерігаються за температури  $+9$  °С. Така тенденція відповідає раніше отриманим результатам для інших видів транспортних засобів та двигунів. Проте, в даному дослідженні спостерігаються вищі значення витрати палива при високих температурах відносно мінімумам, ніж у попередніх дослідженнях. Це може пояснюватись тим, що в літню пору року в автобусах працює кондиціонер для підтримання комфортної температури в салоні. Це, в свою чергу дає додаткове навантаження на двигун і збільшує витрату палива.

2. Характер впливу температури навколишнього середовища на витрату палива описується поліноміальними регресіями другого порядку. Точність отриманих залежностей було підтверджено критерієм Фішера ( $F(0,05)=253,24 > 2,039$  для маршруту А;  $F(0,05)=94,69 > 2,201$  для маршруту D). Отримані результати відповідають тенденціям, описаним в попередніх дослідженнях. Додатково, було встановлено, що вільний член рівнянь відповідає фактичній витраті палива нового автобуса на заданому маршруті.

## Література

1. Passenger transport statistics. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Passenger\\_transport\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Passenger_transport_statistics)
2. Енергетичний баланс України. Сайт Державної служби статистики України. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/energ/en\\_bal/arh\\_2012.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm)
3. Energy, transport and environment statistics (2019). Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: <http://doi.org/10.2785/660147>
4. Complete energy balances. URL: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\\_bal\\_c&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_bal_c&lang=en)
5. Fontaras, G., Zacharof, N.-G., Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. Progress in Energy and Combustion Science, 60, 97–131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>
6. Tsokolis, D., Tsiakmakis, S., Dimaratos, A., Fontaras, G., Pistikopoulos, P., Ciuffo, B., Samaras, Z. (2016). Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of

passenger cars over the New Worldwide Harmonized Test Protocol. *Applied Energy*, 179, 1152–1165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.091>

7. Soares, S. M. C., Sodre, J. R. (2002). Effects of atmospheric temperature and pressure on the performance of a vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 216 (6), 473–477. doi: <https://doi.org/10.1243/09544070260137499>

8. Nam, E. K., Giannelli, R. (2005). Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE). EPA document number: 420-P-05-001. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1001D6I.pdf>

9. MOVES2014a User Guide. Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency (2015). EPA document number: EPA-420-B-15-095. United States Environmental Protection Agency. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100NNCY.pdf>

10. Норми витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті. Третя редакція (2012). Київ: І Видавництво НБЦ «ІнформАвтоДор».

11. Esteban, B., Riba, J.-R., Vaquero, G., Rius, A., Puig, R. (2012). Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. *Biomass and Bioenergy*, 42, 164–171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007>

12. Сахно, В. П., Костенко, А. В., Загороднов, М. І. та ін. (2014). Експлуатаційні властивості автотранспортних засобів. Ч. 1. Динамічність та паливна економічність автотранспортних засобів. Донецьк: Ноулідж.

13. Aladayleh, W., Alahmer, A. (2015). Recovery of Exhaust Waste Heat for ICE Using the Beta Type Stirling Engine. *Journal of Energy*, 2015, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/495418>

14. Luján, J. M., Climent, H., Ruiz, S., Moratal, A. (2018). Influence of ambient temperature on diesel engine raw pollutants and fuel consumption in different driving cycles. *International Journal of Engine Research*, 20 (8-9), 877–888. doi: <https://doi.org/10.1177/1468087418792353>

15. Lee, M.-Y., Lee, G.-S., Kim, C.-J., Seo, J.-H., Kim, K.-H. (2018). Macroscopic and Microscopic Spray Characteristics of Diesel and Gasoline in a Constant Volume Chamber. *Energies*, 11 (8), 2056. doi: <https://doi.org/10.3390/en11082056>

16. Колосюк, Д. С., Зеркалов, Д. В. (2003). Експлуатаційні матеріали. Київ: Арістей.

17. Nanba, S., Iijima, A., Shoji, H., Yoshida, K. (2011). A Study on Influence of Forced Over Cooling on Diesel Engine Performance. *SAE Technical Paper*. doi: <https://doi.org/10.4271/2011-32-0605>

18. Celik, A., Yilmaz, M., Yildiz, O. F. (2020). Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes. *Energy Reports*, 6, 17–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.027>

19. Yan, J. (Ed.) (2015). *Handbook of Clean Energy Systems*. 6 Volume Set. Wiley, 4032.

20. Li, H., Andrews, G. E., Zhu, G., Daham, B., Bell, M., Tate, J., Ropkins, K. (2005). Impact of Ambient Temperatures on Exhaust Thermal Characteristics

during Cold Start for Real World SI Car Urban Driving Tests. SAE Technical Paper Series. doi: <https://doi.org/10.4271/2005-01-3896>

21. Hydrodynamic couplings. Principles. Features. Benefits (2015). Voith Turbo GmbH & Co. KG, Germany: Crailsheim.

22. Vickerman, R. J., Streck, K., Schiferl, E., Gajanayake, A. (2009). The Effect of Viscosity Index on the Efficiency of Transmission Lubricants. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2 (2), 20–26. doi: <https://doi.org/10.4271/2009-01-2632>

23. Ejsmont, J., Taryma, S., Ronowski, G., Świczko-Żurek, B. (2015). Parameters influencing rolling resistance and possible correction procedures. Vienna: AIT Austrian Institute of Technology GmbH.

24. Samuel, M. B., Felix, P., Miguel, Y. N., Cyrille, T. S., Talla, P. K. (2020). Study and simulation of the fuel consumption of a vehicle with respect to ambient temperature and weather conditions. International Journal of Engineering Technologies and Management Research, 7 (1), 24–35. doi: <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v7.i1.2020.480>

25. National Advisory Committee for Aeronautics. Manual of the ICAO standard atmosphere calculations (1996). Langley Aeronautical Lab.; Langley Field, VA, United States.

26. Lohse-Busch, H., Duoba, M., Rask, E., Stutenberg, K., Gowri, V., Slezak, L., Anderson, D. (2013). Ambient Temperature (20°F, 72°F and 95°F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle. SAE Technical Paper Series. doi: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1462>

27. Wang, J. M., Jeong, C.-H., Zimmerman, N., Healy, R. M., Hilker, N., Evans, G. J. (2017). Real-World Emission of Particles from Vehicles: Volatility and the Effects of Ambient Temperature. Environmental Science & Technology, 51 (7), 4081–4090. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05328>

28. Jaworski, A., Mądził, M., Lejda, K. (2019). Creating an emission model based on portable emission measurement system for the purpose of a roundabout. Environmental Science and Pollution Research, 26 (21), 21641–21654. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05264-1>

29. Bielaczyc, P., Szczotka, A., Woodburn, J. (2011). The effect of a low ambient temperature on the cold-start emissions and fuel consumption of passenger cars. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 225 (9), 1253–1264. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407011406613>

30. Lee, Y. K., Park, J. I., Lee, J. H. (2014). Analysis of the effect of cold start on fuel economy of gasoline automatic transmission vehicle. International Journal of Automotive Technology, 15 (5), 709–714. doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-014-0073-z>

31. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., Gutarevych, Y., Tsiuman, M., Goridko, N. (2017). The Evaluation of Vehicle Fuel Consumption and Harmful Emission Using the Heating System in a Driving Cycle. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 10 (1), 236–248. doi: <https://doi.org/10.4271/2017-26-0364>

32. Gritsuk, I. V., Mateichyk, V., Tsiuman, M., Gutarevych, Y., Smieszek, M., Goridko, N. (2018). Reducing Harmful Emissions of the Vehicular Engine by Rapid After-Start Heating of the Catalytic Converter Using Thermal Accumulator. SAE Technical Paper Series. doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0784>
33. Rahimi-Gorji, M., Ghajar, M., Kakaee, A.-H., Domiri Ganji, D. (2016). Modeling of the air conditions effects on the power and fuel consumption of the SI engine using neural networks and regression. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39 (2), 375–384. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-016-0539-1>
34. Shchitov, S. V., Krivuca, Z. F. (2014). Influence of Ambient Air Temperature on the Fuel Efficiency of Vehicles. World Applied Sciences Journal, 30 (3), 362–365. URL: [https://idosi.org/wasj/wasj30\(3\)14/17.pdf](https://idosi.org/wasj/wasj30(3)14/17.pdf)
35. Біліченко, В. В., Підгаєць, В. В., Ткаченко, М. М. (2012). Вплив температури повітря на витрату палива автомобілів. Міжвузівський збірник "Наукові Нотатки", 37, 27–30. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2012\\_37\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2012_37_7)
36. Anisimov, I., Ivanov, A., Chikishev, E., Chainikov, D., Reznik, L., Gavaev, A. (2017). Assessment of adaptability of natural gas vehicles by the constructive analogy method. International Journal of Sustainable Development and Planning, 12 (06), 1006–1017. doi: <https://doi.org/10.2495/sdp-v12-n6-1006-1017>